

# Die Funktion der Wasserstoff-Druckgas- Transport- und Speicherleitung in einer Wasserstoff-Wirtschaft

Justi, Eduard  
Brennecke, Peter  
Kleinwächter, Jürgen

Veröffentlicht in:  
Abhandlungen der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 32, 1981,  
S.153-185



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

## Die Funktion der Wasserstoff-Druckgas-Transport- und Speicherleitung in einer Wasserstoff-Wirtschaft\*

Von **Eduard Justi**, Braunschweig, **Peter Brennecke**, Braunschweig,  
und **Jürgen Kleinwächter**, Lörach

(Eingegangen am 30.10.1981)

### Zusammenfassung

Unter Wasserstoffwirtschaft versteht man eine Energie-Organisation, bei der alle verfügbaren Primärenergiequellen benutzt werden, um  $H_2$  zu erzeugen, der dann als 100%ig umweltkonformer, unerschöpflicher Vielzweck-Sekundärenergieträger einfach und preiswert gespeichert, transportiert und verteilt werden kann, und dessen Verbrennungsprodukt als reiner Wasserdampf von selbst durch die Biosphäre in die Gewässer zurückkehrt, also in der sog. „göttlichen Ordnung“ der Natur, wobei die heute so bedrängenden atemgiftigen Produkte aller bisherigen Verbrennungsreaktionen entfallen. Je nachdem ob man als unerschöpfliche Primärenergie überwiegend Sonnen- oder Kernenergie verwendet, spricht man von Solar-Wasserstoff-Wirtschaft oder Nuklear-Wasserstoff-Wirtschaft (Fig. 1). Kennzeichnend ist die Möglichkeit, die  $H_2$ -Erzeugung durch Wasserelektrolyse an entfernten Gestaden vorzunehmen, wo reichlich Kühlwasser, Gelände und Sonnenschein zur Verfügung stehen, den kompri-

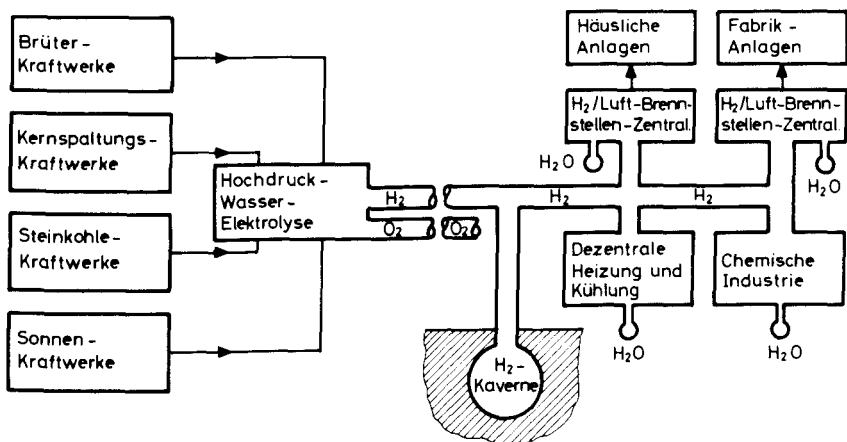


Fig. 1:

Blockschema verschiedener Arten von  $H_2$ -Wirtschaften  
auf der Basis von Brüter-Leichtwasserreaktor-, Kohle- und/oder Solar-Kraftwerken.

\* Herrn Professor Dr. Martin Kersten zum 75. Geburtstag gewidmet.

mierten  $H_2$  durch die bei der Erdgas-Wirtschaft bewährte Technologie über einige  $10^3$  km durch Stahlrohr-Pipelines zu den klimatisch bevorzugten dicht besiedelten Gebieten wie Mitteleuropa zu leiten, wo das Druckrohrnetzwerk nicht nur den Transport, sondern auch Speicherung und Verteilung übernimmt. Speziell die Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft ist vor kurzem in einer Monographie von Bockris und Justi (1) eingehend durchgearbeitet worden, wobei auch die Zwischenstufe der Sonnenenergie-Verstromung behandelt wurde, die in den letzten Monaten durch den Aufbau mehrerer solarthermischer Kraftwerke im MW-Bereich in klimatisch geeigneten Gegenden mit viel Sonnenscheinstunden wie Sizilien und Südspanien konkretisiert worden ist für diejenigen, denen Aufbau und Betrieb der noch größeren west- und südamerikanischen „Power-Tower“-Solarkraftwerke entgangen sind. So bleibt als nächste dringende Aufgabe die Durchrechnung der  $H_2$ -Stahlrohrnetze, die über z. B. 2000 km Distanz das Druckgas wirtschaftlich konkurrenzfähig z. B. von den Mittelmeerküsten hierherbringen sollen, nachdem der sonst übliche Transport durch hochgespannten Strom in Freileitungen zu teuer und zu empfindlich ist. Gewiß handelt es sich um technische Aufgaben, die längst industriell bewältigt sind, aber es ergeben sich doch durch die nur 12stündliche Periode der Sonnenverstromung und durch die Überlagerung der  $H_2$ -Transport- und Speicheraufgaben unerwartete Komplikationen, die allerdings die Möglichkeit einer effektiven Optimierung der Rohrabmessungen und Betriebsdrucke, der regenerativen  $H_2$ -Kompressionsenergie-Wiedergewinnung und der Kombination der  $H_2$ - mit einer Abfall- $O_2$ -Verwertung anbieten, die bewirken, daß die kWh aus Solarenergie durchaus nicht prohibitiv teurer wird als die konventionelle oder die nukleare. Dies wird durchgerechnet und in Tabellen und Diagrammen überzeugend dargestellt.

### **Stand und Problematik der gegenwärtigen Energiekrise**

Das heute häufigste Thema privater und öffentlicher Diskussionen ist die sog. ENERGIEKRISE, obwohl die meisten Bürger nicht präzise wissen, worum es sich dabei handelt; aber jedenfalls betreffen diese Beschwerden nicht eine einheitliche Erscheinung, sondern – in der Sprache der Medizin – ein sog. „SYNDROM“, also ein Zusammentreffen verschiedener Einzeleffekte, deren jeder für sich nicht tragisch ist, deren Koinzidenz aber leicht eine ernste Wendung herbeiführen kann – in diesem Fall für die zukünftigen Lebenschancen der Menschheit.

Von diesen Teileffekten erwähnen wir zuerst die Energiekrise im engeren Sinne, also den Zustand, wo der Verbrauch von Primärenergie wie Kohle, Erdöl, Erdgas, neuerdings auch Uran, von Jahr zu Jahr beschleunigt zunimmt und andererseits der Restbestand dieser in Gigajahren in der Erdkruste angereicherten, für unerschöpflich gehaltenen Energieträger von Jahr zu Jahr beschleunigt abnimmt; der Umstand, daß sowohl der Verbrauch wie der Restbestand sich beschleunigt ändern, bewirkt, daß die Vorräte nicht über Jahrhunderte oder Jahrtausende schwinden, sondern innerhalb weniger Jahre, und zwar Kohle, Öl und Gas fast gleichzeitig, weil man ja versuchen wird, von einem sich zuerst erschöpfenden Energieträger auf einen noch langsamer

ausgehenden umzuschalten. Deshalb kann man mit recht großer Sicherheit extrapolieren, daß „der Tag des jüngsten Gerichts“, des Zusammenbruches unserer Energieversorgung, um das Jahr 2035 hereinbrechen wird, falls wir nicht die Forderung der Nationalökonomien nach einer alljährlich positiven Zuwachsrate der Wirtschaft zurückweisen.

Als zweiten Teileffekt des Energie-Syndroms sprechen wir die ebenfalls beschleunigt wachsende Verschmutzung, ja Vergiftung der Umwelt, namentlich der Atmosphäre und der Gewässer besonders durch die bei allen technischen Verbrennungsprozessen anfallenden Schadstoffe an. Für 1977 hatte die Bundesregierung die Konzentration dieser Atemgifte in unserer Umluft wie Schwefeldioxyd ( $\text{SO}_2$ ), Nitroxyden ( $\text{NO}_x$ ), Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ), Kohlenwasserstoffe ( $\text{C}_m\text{H}_n$ ) wie Methan ( $\text{CH}_4$ ), Kohlenmonoxyd ( $\text{CO}$ ), Dämpfe, Ruß und andere Schwebeteilchen auf 20 Mio. to beziffert – eine kaum vorstellbare Zahl! Leichter erfaßt man noch die spezifische Belastung von 20 Mio. to / 70 Mio. Einwohner  $\approx$  400 kg/Einwohner, also 5 mal das Eigengewicht jedes Bürgers! Das ist eine massive Gesundheitsbedrohung, die man nicht mehr verharmlosen darf.

Als dritten Teileffekt des Syndroms besprechen wir kurz die Rolle des in unserer Aufzählung nicht genannten Kohlendioxyds  $\text{CO}_2$ , das Hauptprodukt jeder Verbrennung in Haushalt, Industrie, Verkehr sowie Land- und Forstwirtschaft. Wir hatten es bisher nicht mit aufgezählt, weil  $\text{CO}_2$  als ungiftig gilt und als Bläschen in Erfrischungsgetränken sogar die Lebensfreude heben soll. Der Schrecken kam erst spät, als Woodwell (Fig. 2) verlässlich messen konnte, daß die  $\text{CO}_2$ -Immission in die Atmosphäre

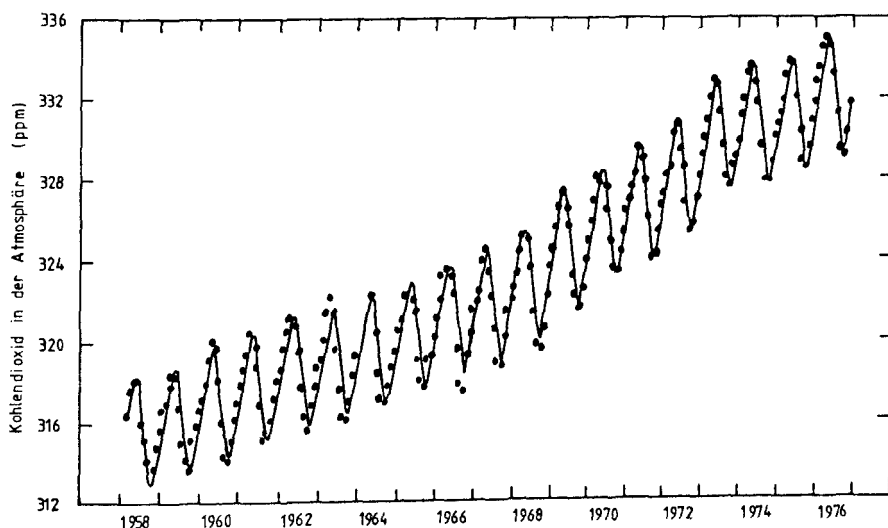


Fig. 2:

$\text{CO}_2$ -Gehalt in der Atmosphäre über Hawaii als Funktion der Jahreszeiten 1958–1976.

(Quelle: Woodwell 1978)

jährlich 5000 Mio. to beträgt, also 1250 kg gewichtsmäßig bzw. 600 Nm<sup>3</sup> n.p.t. volummäßig je Erdenbürger. Wegen der starken Absorption der infraroten Rückstrahlung der Erde, die in den erwähnten Konzentrationen der CO<sub>2</sub> ähnlich stark ist wie in den Glasscheiben unserer Gewächshäuser, steigt die Temperatur unserer Luft-hülle dauernd an; in der Würmeiszeit vor 50 000 Jahren betrug die CO<sub>2</sub>-Konzentration nur 0,02%, stieg erst durch die Zerstörung der mediterranen Wälder durch Christen und Moslems, dann durch die Entwaldung Mitteleuropas und die beginnende Industrialisierung auf 0,022% an und wird bei dem jährlichen Wachstum um 0,2% bis zum kritischen Jahr 2035 0,03% erreichen, was eine Erwärmung der Atmosphäre um ca. 2° ausmachen sollte (Fig. 2). Wie Fig. 3 veranschaulicht, werden dadurch weite Teile des arktischen Eises abschmelzen und dies Schmelzwasser große Gebiete Englands sowie Mitteleuropas überfluten, die äquatorialen Häfen sogar bis zu ca. 50 m – auch ein Grund, Energiegewinnung mittels Verbrennung herkömmlicher Energieträger sowie Rodung der äquatorialen Regenwälder als Hauptspeicher der CO<sub>2</sub> radikal zu unterbinden.

Der Amerikaner Woodwell, der Entdecker der in Fig. 2 wiedergegebenen, jahreszeitlich abwechselnden Ad- und Desorption der atmosphärischen CO<sub>2</sub> in den Blättern

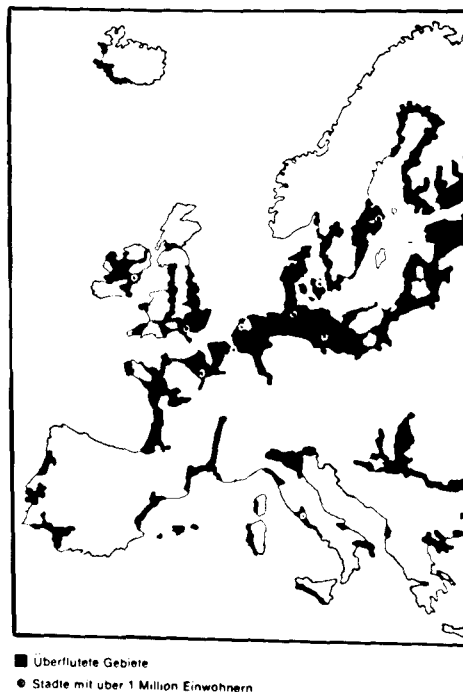


Fig. 3:

*Von Überflutung durch Abschmelzen der Polkappen gefährdete Gebiete Europas.*

und in der Holzmasse der großen Bäume, schreibt hierüber: „The potential hazard associated with a steady increase in the carbon dioxide content of the atmosphere will become large in the coming decades and will bear heavily on such decisions as whether to accelerate the development of power plants based on coal and whether to preserve forest areas instead of encroaching on them ... there is almost no aspect of national and international policy that can remain unaffected by the prospect of global climatic change. Carbon dioxide, until now an apparently innocuous trace gas in the atmosphere, may be moving rapidly toward a central role as a major threat to the present world order.“

Die einzige radikale Heilung unserer Energie-Syndrom-Beschwerden bestände in völligem Verzicht auf den Mißbrauch fossiler Energieträger zur Gewinnung von Primärenergie, was aber mit dem Zusammenbruch unserer Energiewirtschaft erkauft würde, die kaum von Wasser- und Windkraft alleine aufrechterhalten werden könnte.

### Wasserstoff als synthetischer C-freier Energieträger – die Rettung

In dieser für ausweglos gehaltenen Notlage bietet sich als deus ex machina die Konzeption der WASSERSTOFFWIRTSCHAFT an; danach führen wir als synthetischen Mehrzweck-Universal-Energieträger Wasserstoffgas  $H_2$  ein, das durch elektrolytische Zerlegung von Wasser  $H_2O$  mittels einer Dissoziationsenergie  $Q$  gewonnen wird gemäß  $H_2O + Q \longrightarrow H_2 + 1/2 O_2$ . Die beiden Gase kann man in beliebigen Mengen erhalten, speichern, transportieren und bei Energiebedarf durch gewöhnliche Verbrennung oder „Kalte Verbrennung“ über einen geeigneten Elektrokatalysator

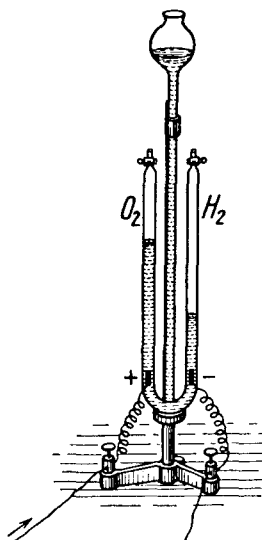


Fig. 4:

Anordnung zur Wasserelektrolyse nach Hoffmann.

wiedervereinen, wobei die eingesetzte Spaltungsenergie  $Q$  wiedergewonnen wird gemäß  $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O + Q$ .

Die einer  $H_2$ -Menge entsprechende elektrische Energie können wir messen, indem wir beide Schenkel des Hoffmann'schen Elektrolyseurs (Fig. 4) mit durch KOH leitfähig gemachtem  $H_2O$  füllen und dann eine bestimmte Zeitdauer (z. B. genau 1 h) einen definierten Gleichstrom (z. B. 1,0000 Amp.) hindurchleiten, also eine Ladung von 1,0000 Amp. h, die dann 626 cm<sup>3</sup> Knallgas (bei 0°C und 1 Atm.) abspaltet, davon  $2/3 = 417,3$  cm<sup>3</sup>  $H_2$  und 208,7 cm<sup>3</sup>  $O_2$  (Fig. 4). Die präzise gemessene minimale Abscheidungsspannung beträgt bekanntlich  $U_0 = 1,23$  V, und der Elektrolyse-Energieaufwand  $4,173 \cdot 1,23 = 5,133$  W. h/L; auf den Nm<sup>3</sup>  $H_2$  umgerechnet 1,23 kWh, in kalorischem Maß (entsprechend 860 kcal = 1 kWh) sind es 29 kcal/g, der bei weitem höchste gewichtsspezifische Heizwert (dagegen Erdgas  $CH_4$  nur 12,0 kcal/g, das umgekehrt einen dreimal höheren Heizwert pro Volumeneinheit hat als  $H_2$ ). Fig. 5 ist ein bekanntes Diagramm des American Institute for Gas Technology, Chicago, über die Kosten einer transportierten Energieeinheit als Funktion der Transportdistanz für verschiedene Energieträger wie  $H_2$ ,  $CH_4$ , hochgespannten

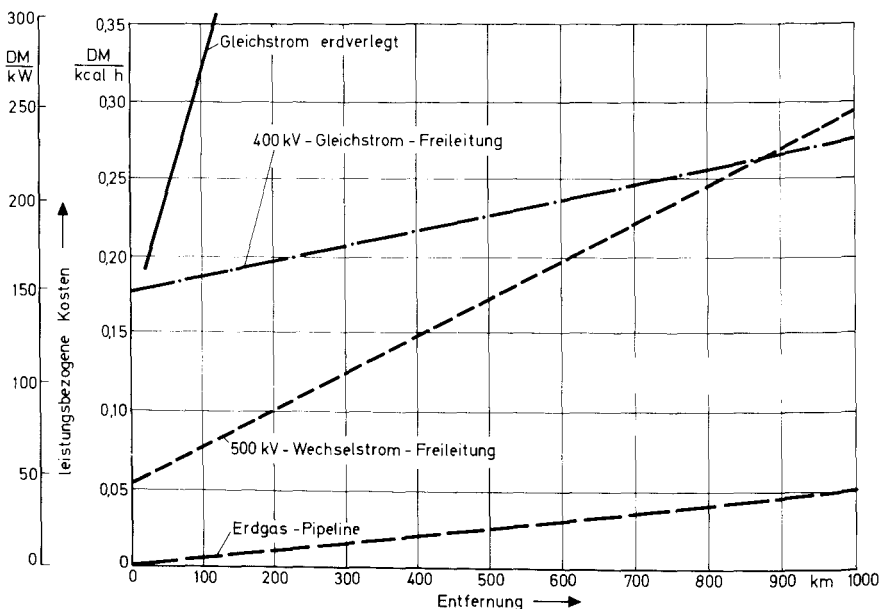


Fig. 5:

Vergleich der Transportkosten in DM/kcal/h (linke Ordinate) oder in DM/kW (ganz links) als Funktion der Transportdistanz in km (Abszisse). Verglichen werden Erdgas ( $CH_4$ , unterste Gerade), 500 kV Wechselstrom (mittlere Gerade) und Gleichstrom-Erdkabel (Gerade oben links).

Schraffiertes Feld: Elektrolyt- $H_2$  in Hochdruck-Stahlrohrleitung (wie Erdgas) mit durch die Elektrolytkosten gegebener Bandbreite. Ab 380 km kann der Energietransport durch  $H_2$ -Pipeline billiger sein als über Hochspannungs-Freileitung. Nach Gregory u. M.

Wechselstrom und Gleichstrom (4). Laien haben bemängelt, daß hier zwar die Gerade für die Erdgasleitung im Nullpunkt beginnt, das Erdgas selbst also nichts kostet, daß aber die hierzu ungefähr parallele Gerade für eine H<sub>2</sub>-Pipeline bei 0 km Transportstrecke bereits mit einem die Herstellungskosten deckenden Zuschlag beginnt, der unwirtschaftlich hoch sei. Tatsächlich handelt es sich dabei um die Herstellungskosten durch Elektrolyse, also minimal den eben erwähnten Heizwert von ca. 29 kcal/Nm<sup>3</sup>. Beim synthetischen Energieträger möchte man indessen diese Grundenergie keineswegs verkleinern, denn sie ist ja der gespeicherte Energiebetrag, der nach der Wiedernahme am Leitungsende mit einem möglichst hohen Wirkungsgrad nutzbar gemacht werden soll. Dem Laien meist geläufiger ist der elektrische Fall eines Sekundärenergieträgers, nämlich die Starterbatterie, wo beim Laden bzw. Entladen jeweils rund 20% der elektrischen Energie verlorengehen, so daß der Gesamtspeichereffizienzgrad kaum über 60% erreicht – ähnlich, wie beim Be- und Entladen unseres elektrochemischen Sekundärenergie-Trägersystems  $\text{H}_2\text{O} + \text{Q} \rightleftharpoons \text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$  gemäß der Grundgleichung der Wasserstoff-Wirtschaft. Auffallend in diesem Diagramm ist das schraffierte Band, das die Variationsbreite des Wirkungsgrades des H<sub>2</sub>-Energieträgers anzeigt und erfahrungsgemäß selbst bei sonst sachkundigen Ingenieuren oder Volkswirten Zweifel an der wirtschaftlichen Brauchbarkeit der Konzeption der Wasserstoffwirtschaft erwecken kann.

### **Billigster Langstrecken-Energietransport durch H<sub>2</sub> als Essential**

Gewiß liegt ein umfangreiches theoretisches und praktisches know how über alle Einzelheiten des elektrischen Energietransportes in vielen Ländern vor, und bezüglich Erdgastechnologie haben die USA mit ihrem über 250 000 km langen Erdgas-Rohrnetz eine unvergleichbare Erfahrung (4), mit der andere Länder nicht konkurrieren können, außer Deutschland, wo schon vor über 40 Jahren dessen damals führende chemische Großindustrie (5) unter Initiative der Chemischen Werke Hüls („CWH“) eine heutzutage 208 km lange Druckleitung zwischen Dortmund und Köln konstruierte, in welche 28 Großfirmen H<sub>2</sub> teils einspeisten, teils entnahmen, wie die Landkarte (Fig. 6) zeigt. Die Vorhersage besonderer Billigkeit und Sicherheit des H<sub>2</sub>-Transportes und der Vermeidung der bekannten Gefahr der Versprödung der Stahlrohre unter Einwirkung des hochkomprimierten H<sub>2</sub> kann zwar Bewunderung erregen, doch keine Überraschung, denn die letztere Erscheinung hängt mit der Entwicklung der wissenschaftlichen Metallkunde überhaupt durch die Tamman'sche Schule in Göttingen und dem Übergang der Stahlherstellung gemäß Geheimrezept der Meister zur systematischen Stahlforschung in den Krupp'schen Forschungslaboratorien in Essen kausal zusammen. Göttingen war nicht minder wichtige Voraussetzung für die Konzeption einer H<sub>2</sub>-Pipeline, weil dort gleichzeitig Prandtl die wissenschaftliche Strömungslehre begründete, und seine Formeln für die Gasdynamik überhaupt und die turbulente Strömung kompressibler Gase insbesondere erst begreifen ließ, wieso dieser wegen seiner minimalen Dichte so schlecht in Druckflaschen oder Dewargefäßen oder sorbiert transportable H<sub>2</sub> eben dank seiner minimalen Vis-



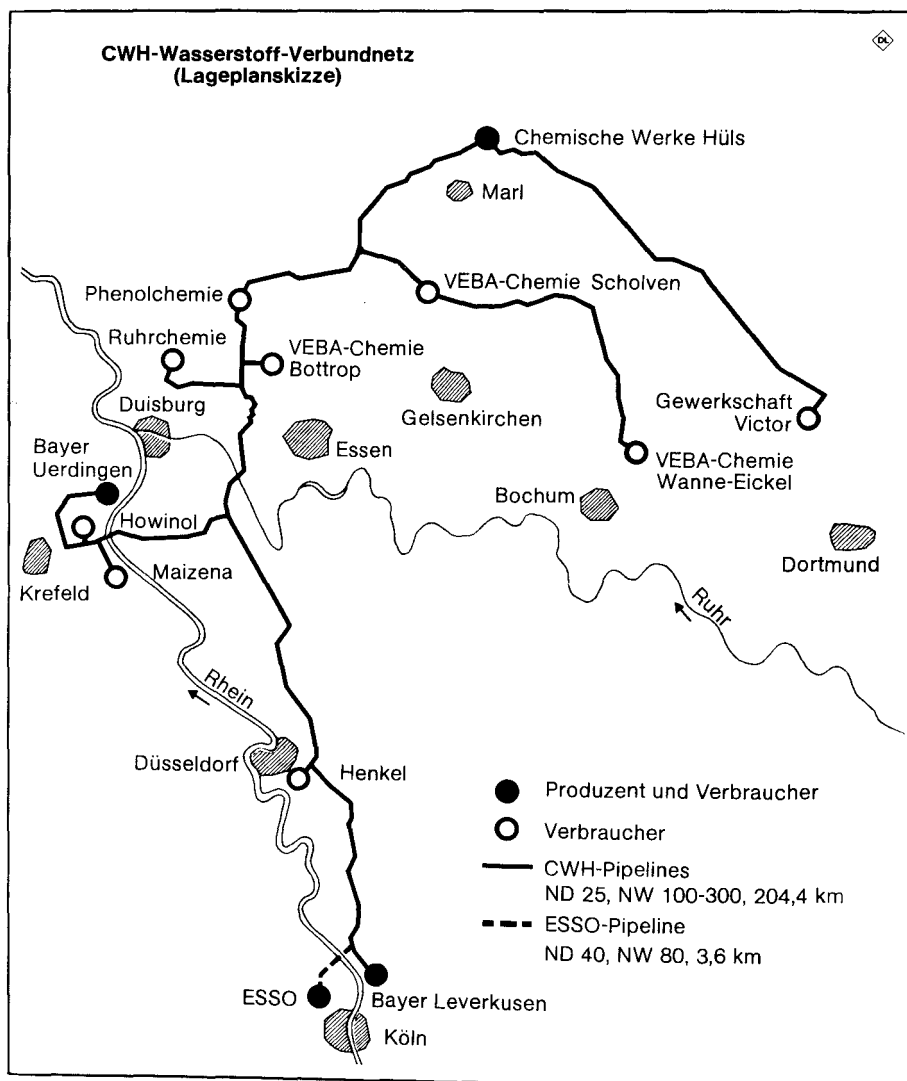


Fig. 6:  
Darstellung des 208 km langen, seit 40 Jahren bewährten  $H_2$ -Leitungsnetzes  
an Rhein und Ruhr.

(Quelle: Isting und Thier 1975)

kosität und Wichte der Favorit für den Fern- und Großtransport durch Druckrohrleitungen aus Standardstählen werden konnte.

Fig. 7 vergleicht den 66 m hohen Standard-Mast einer Hochspannungsleitung für 2,5 GW bei 400 kV mit einer darunter vergrabenen  $H_2$ -Stahlröhre von ca. 1 m l. W. und etwa der doppelten Energietransportleistung, um anschaulich plausibel zu machen, wieso der  $H_2$ -Gas-Transport a priori billiger ist als der durch elektrische Leitungen (6). Es sind nicht nur die Metallteile und Betonsockel, sondern schon die laufenden Pachten für die Freiflächen, die bei der Hochspannungsleitung minimal  $2 \times 100$  m verlangen, bei der  $H_2$ -Röhre nur  $1 \times 10$  m. Auch die Landschaftsveranschaulung, gegen die man empfindlich zu werden scheint, entfällt bei der Gasleitung, die nur 1 m tief vergraben wird und offenbar auch gegen Gewalteinwirkung sicherer ist.

### 40 Jahre positive Erfahrungen mit der deutschen $H_2$ -Pipeline

Die nunmehr über 40 Jahre erprobte deutsche  $H_2$ -Pipeline verläuft keineswegs nur in freier Landschaft, sondern in Europas dichtest besiedeltem Industrie- und

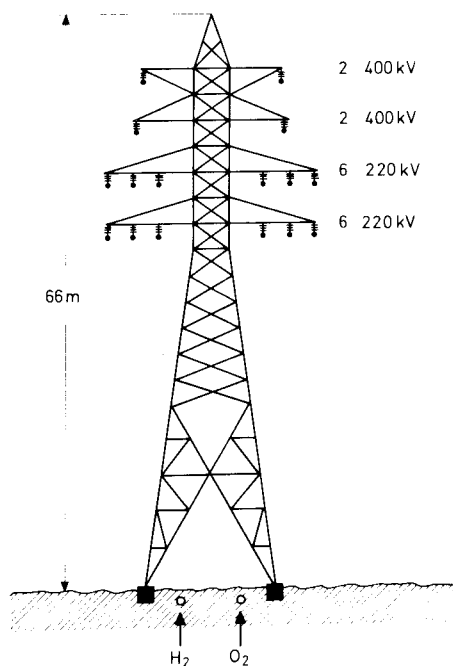


Fig. 7:

Größenvergleich zwischen einem Standard-Hochspannungsmast für 2,5 GW Leistung und zwei Druckgasrohrleitungen derselben Leistung (im Erdboden vergraben) für den Transport von  $H_2$  und  $O_2$ .

Bergbaugebiet, nämlich durch 8 Großstädte wie Gelsenkirchen (800 000 Einwohner), Bottrop (120 000), Gladbeck (85 000), Essen (750 000), Duisburg (500 000), Düsseldorf (700 000), Leverkusen (100 000) und Krefeld (220 000), insgesamt die Wohn- und Arbeitsstätten von über 3 Mio. Anwohnern, ohne daß jemals ein Unglück oder nur eine Andeutung einer der modernen Bürgerinitiativen vorgekommen wäre. Dieser praktische Test einer Druckwasserstoff-Fernleitung, die bei zahlreichen Laien auch heute noch als extrem gefährlich gilt, ist auch insofern besonders streng, als im betroffenen Bergbaugebiet dauernd Bodenbewegungen (Pressungen, Zerrungen und Senkungen) auftreten, die die Lage der Stahlrohre verändern, was mit Hilfe von Dehnungsschleifen offenbar problemlos beherrscht wird – ein Gesichtspunkt, der auch für die künftige Anwendbarkeit von  $H_2$ -Leitungen in den mittelmeeischen Erdbebengebieten überzeugend ist.

Die Überwachung des gesamten Netzwerkes erfolgt von einem zentralen Meßstand aus (Fig. 8), der Tag und Nacht besetzt ist und in meist direkter telephonischer Verbindung mit allen angeschlossenen Einspeisern und Abnehmern von  $H_2$  steht. Mengen, Drucke und Temperaturen werden gemessen, zur Zentrale fernübertragen und dort automatisch registriert, wo man auch in einem Schema des gesamten Verbundnetzes alle fernbedienten Absperrorgane und deren Schaltzustand ersieht. Wohl-

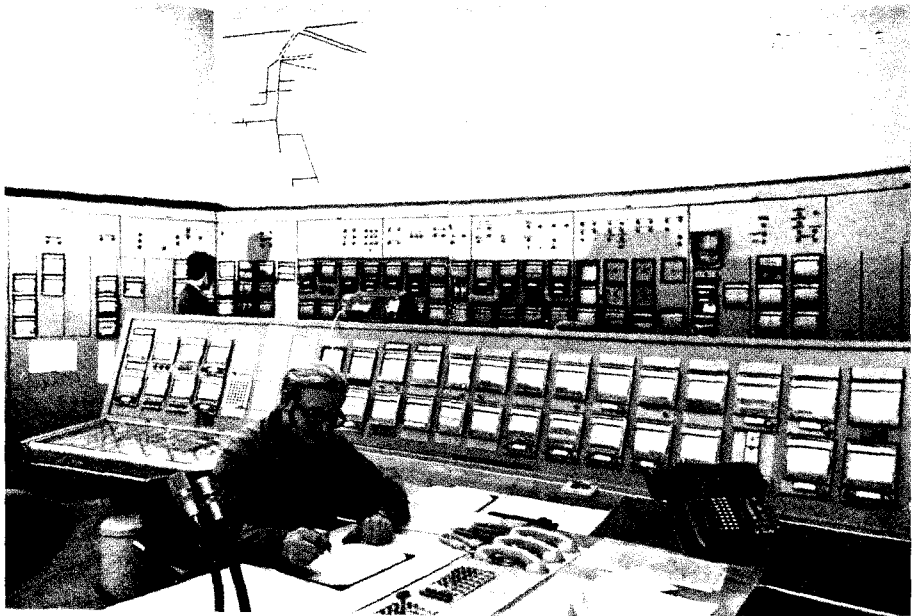


Fig. 8:  
Zentraler Leitstand des  $H_2$ -Druckrohernetzes der Chemischen Werke Hüls  
im westdeutschen Industriegebiet.  
(Quelle: Isting und Thier 1975)

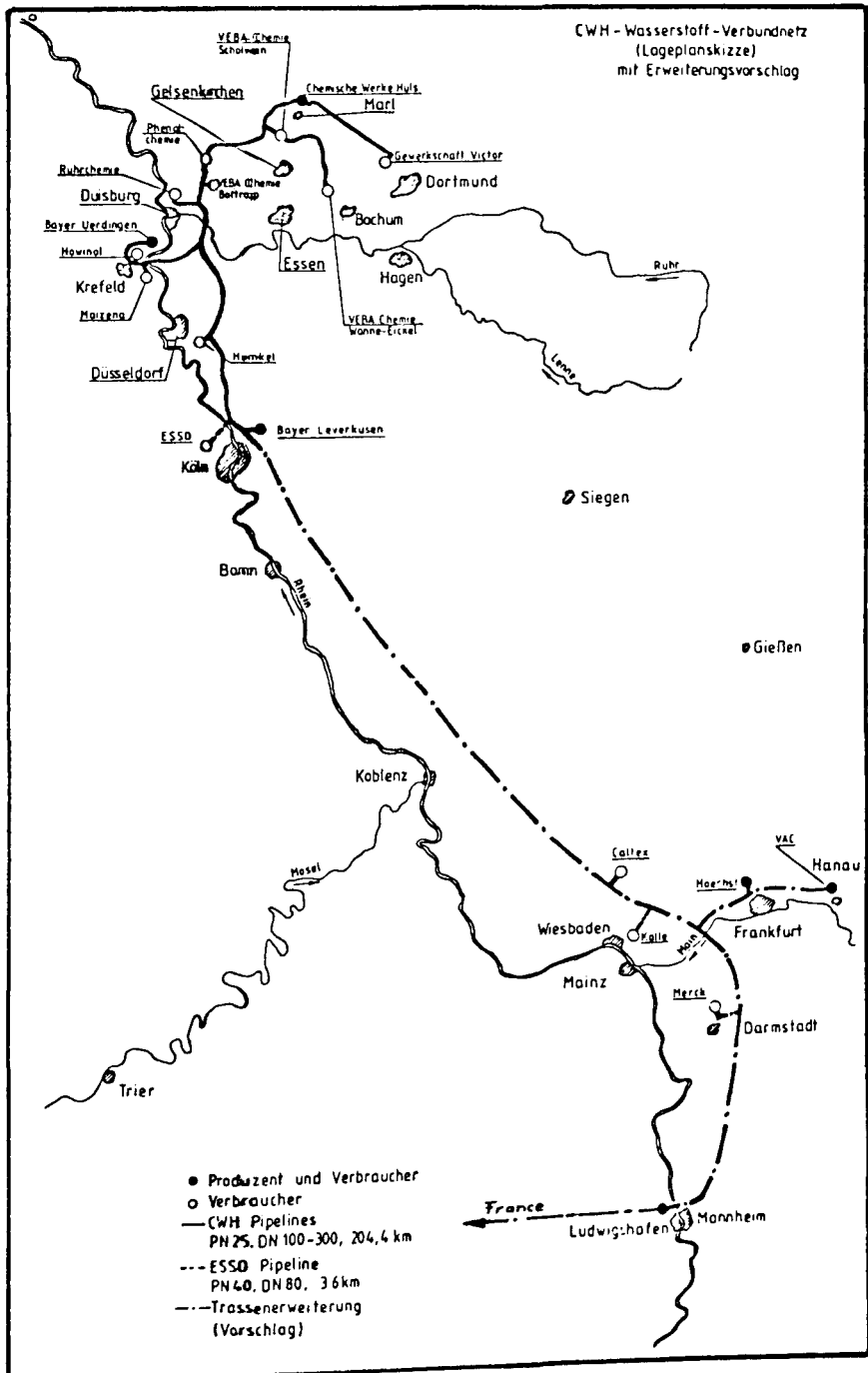


Fig. 9:

Vorgeschlagene Verlängerung der bereits bestehenden  $H_2$ -Pipeline bis Mannheim.

gemerkt bestanden zur Zeit der Konstruktion keine behördlichen Vorschriften für den Umgang mit dem angeblich so gefährlichen  $H_2$ , sondern es handelte sich dabei um interne freiwillige Betriebsvereinbarungen der Teilhaber. So ist man sicher, daß in den letzten 4 Jahrzehnten nie  $H_2$ -Mengen über die Meßgenauigkeit hinaus entwichen sind. Man ist auch sicher, daß an der vollständigen Dichtigkeit keine Zweifel bestehen, und daß dieses Transportsystem für  $H_2$  nicht nur das ökonomischste, sondern auch sicherste ist, und daß bei geschickter Auswahl der Drucke, Rohrdurchmesser und Wandstärken auch nie Probleme infolge Verzicht auf teurere Sonderstähle entstanden sind. Auch der kathodische Schutz gegen Rostschäden aus dem Erdboden ist hier als technologischer Durchbruch zu werten (5).

In Deutschland freut man sich sehr, daß auch die Gaz de France (7) plant, ein  $H_2$ -Pipelinennetz von 1100 km Länge zu konstruieren, und wir schlagen gemäß der Landkarte (Fig. 9) vor, die beiden  $H_2$ -Netze der größten europäischen Industrienationen zu verbinden, wobei die BRD auch die chemische Industrie bei Frankfurt und Ingolstadt einbeziehen sollte, was weniger kostet als neue Kernreaktorprojekte und sofortigen konkreten Nutzen bringt, nicht zuletzt für die gigantischen französischen Kernreaktorbauten nach Fortfall der derzeitigen herkömmlichen Spitzenkraftwerke.



Fig. 10:  
In den schraffierten europäischen Gebieten  
überschreitet die Windgeschwindigkeit 4 m/s;  
hier wären Standorte für wirtschaftliche  
Windkraftwerke.

(Quelle: Hütter 1977)

Wenn es tatsächlich gelingt, Energie in Form von Druckwasserstoff über einige 1000 km nicht wesentlich teurer zu transportieren, zu speichern und zu verteilen als bisher mittels elektrischem Strom, dann ist es nicht mehr nötig, die Kraftwerke möglichst dicht an oder mitten in den Verbraucherzentren zu plazieren, sondern wir können die Vorteile einer Trennung wahrnehmen (vgl. Fig. 1). So können wir Windenergie dort sammeln, wo sie mit Luftgeschwindigkeiten über 4 m/sec vom Meer auf die Küste auftrifft (vgl. Fig. 10), um dort mit windgetriebenen Generatoren Elektrolytwasserstoff zu erzeugen, zu speichern und über mehr als 1000 km zu unseren in klimatisch bevorzugten Gegenden gelegenen Städten zu leiten. Ähnlich können wir Großkraftwerke für fossile Energieträger an stadtfernen Küsten aufbauen, wo man genug Wasser nicht nur für Kühlung, sondern auch zur Reinigung der Rauchgase hat, und wiederum statt des elektrischen Stromes den erzeugten Elektrolyt- $H_2$  in genügend weit entfernte Verbraucherzentren leiten. Eine ähnliche Trennung würde auch die Kernenergie akzeptabler machen, abgesehen davon, daß hier  $H_2$  endlich das Problem der Pufferung des in Grundlast mit unveränderlicher Last fungierenden Kernreaktors bei Tallast und Spitzenlast spielend lösen könnte. In diesem Zusammenhang können wir das von uns in unserer Monographie ausführlich dargestellte Problem der Standorttrennung (Fig. 1) nur andeuten und das schematische Bild der Wiederherstellung der sog. natürlichen oder „göttlichen Ordnung“ der Natur (Fig. 11) in Erinnerung bringen. In diesem Schema sehen wir, wie Meer- oder Süßwasser von einer unerschöpflichen Primärenergiequelle – Leichtwasserreaktor oder ganz sicher Sonnenenergie – zur Gewinnung von Elektrolyt- $H_2$  benutzt wird, der dann von Meer zu Stadt durch eine Druckgasleitung geleitet, gespeichert und verteilt wird. Bei der Energie  $Q$  spendenden thermischen oder elektrochemischen Oxydation des  $H_2$  mittels

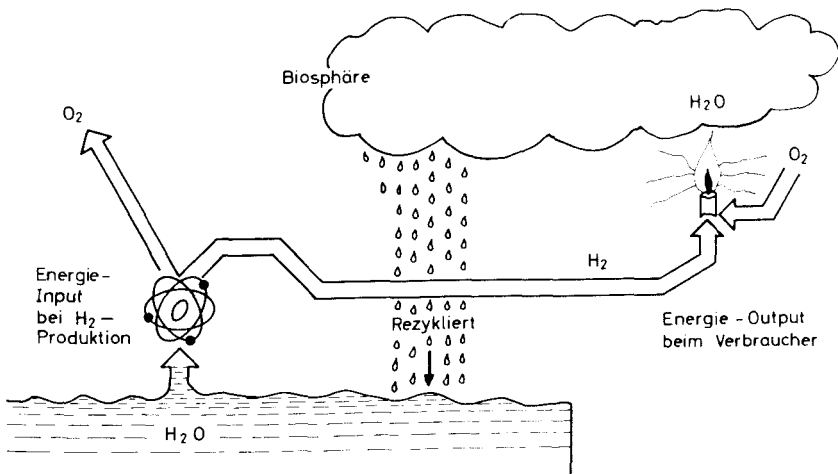


Fig. 11:

Gewinnung des  $H_2$  aus  $H_2O$  und Recycling des Verbrennungsproduktes  $H_2O$  durch die Biosphäre. Nach Seifritz.

Luft- oder Elektrolyse- $O_2$  bildet sich als einziges Reaktionsprodukt („Asche!“) gemäß  $H_2 + 1/2 O = H_2O_{\text{Dampf}} + Q$ , der ohne weiteres menschliches Zutun zu den Wolken aufsteigt und „von selbst“ in die Gewässer zurückkehrt (Fig. 11). Dieser Prozeß ist so einfach und einzigartig, daß auf die Dauer keine andere Möglichkeit bleibt; Bockris sieht als einzige Hemmung die Unbildung in Elektrochemie, und den Konservatismus eingefahrener Berufe und Handwerke. Unter dem Eindruck unserer Monographie „Wasserstoff – die Energie für alle Zeiten“ (1) begreifen aber immer mehr Mitmenschen – auch „Entscheidungsträger“ –, daß sich die Wasserstoffwirtschaft nicht spezifisch aggressiv gegen eine herkömmliche wie z.B. Nuklearenergie wendet; der Widerstand läßt nach, und nun kommt es hauptsächlich auf die finanziellen Bedenken an: Wie teuer ist der Energietransport über Wasserstoff-Gas? Wie meist, gibt es auch für diese Frage verschiedene Gutachten; in der kapitalistischen Wettbewerbsindustrie ist das wertvollste eine Projektstudie, wo das Gutachten mit Festpreis und fester Lieferfrist (hier 2 Jahre) verbunden ist, wozu die Autoren die auf diesem Gebiet erfahrenste deutsche Firma, die Messer-Griesheim GmbH, Gasabteilung Düsseldorf („MGG“), aufgefordert hatten\*) (8).

## **Berechnungen einer 2150 km langen $H_2$ -Speicher-, Transport- und Verteilungsleitung für $10^{10} \text{ Nm}^3 H_2/a$ mit 3 Druckhaltestationen für 100, 60 und 40 ata Betriebsdruck**

### **1. Rohrleitung**

#### **1.1 Durchsatzmenge**

Nachdem die COMPLES-Kommission für Sonnenstrahlung und Umwelt unter der Leitung der Professoren P. Blanco und L. de Azcarraga, Madrid, in langjährigen Arbeiten festgestellt hatte, daß Südspanien und Süditalien prädestiniert als Standorte für Sonnenkraftwerke seien (1), insbesondere die Mittelmeerküste zwischen Malaga und Almeria, oder Huelva nahe Gibraltar, wurde der MGG die Aufgabe gestellt, eine solarthermische  $H_2$ -Anlage zu projektieren, die bei rund 8700 h/Jahresbetriebsstunden rund  $10^{10} \text{ Nm}^3/a$   $H_2$ -Produktion ergibt; dazu müssen je Stunde Sonnenschein 1,15 Mio.  $\text{Nm}^3 H_2/24 \text{ h} = 2,75 \text{ Mio. Nm}^3/h$  erzeugt und auf 100 bar Anfangsdruck komprimiert werden. Das entsprach rund 10% des Strombedarfs der BRD.

### **2. Investitionen**

**2.1** Die  $H_2$ -Rohrleitung Gibraltar–Karlsruhe wird nach Ausmessung auf der Landkarte ca. 2150 km lang werden und aus Stahlrohren NW 1000, 1100 mm, be-

---

\*) Den Autoren der Studie, Dir. Dipl.-Ing. Kl. Baumgärtner und Dipl.-Ing. R. Kipker, sind wir für diese Arbeit, dem Hauptgeschäftsführer, Senator Dr. H. Messer, Präsident der IHK Frankfurt, für die Publikationserlaubnis, zu Dank verpflichtet. – Herrn Dipl.-Phys. H.-J. Selbach danken die Autoren für seine Mitarbeit.

stehen, mit einem Normaldruck („ND“) 100–60–40 bar. Die Gesamtkosten betragen in betriebsfähigem Lieferzustand incl. aller Nebenkosten nach dem Stand 1974

$$= 1.840 \text{ Mia. DM}$$

## 2.2 Nebenkosten für Verwaltungsgebäude, Betriebsüberwachungs-Einrichtungen usw.

$$= \frac{0.010 \text{ Mia. DM}}{1.850 \text{ Mia. DM}}$$

## 2.3 Lohnkosten

$$\begin{aligned} 4 \text{ Leitendes Personal à } 120.000 \text{ DM/a} &= 480.000 \text{ DM/a} \\ 10 \text{ Angestellte und Techniker à } 70.000 \text{ DM/a} &= 700.000 \text{ DM/a} \\ 20 \text{ Reparatur- und Überwachungspersonal à } 40.000 \text{ DM/a} &= 800.000 \text{ DM/a} \\ &\approx \underline{\underline{2.000.000 \text{ DM/a}}} \end{aligned}$$

## 2.4 Kapital-Dienst

Die Lebensdauer der Speicherröhre wird mit 25 a als gutem Mittelwert angesetzt.

4% Abschreibung

1,5% Reparaturen und Überwachung

1,5% Steuern und Versicherung

7% (ohne Rendite und kalkulatorische Zinsen!).

7% von 1.850 Mia. DM

aufgerundet

$$\begin{aligned} &= 129,5 \text{ Mio. DM} \\ &= 130 \text{ Mio. DM/a} \end{aligned}$$

## 2.5 Laufende Kosten (Durchleitungs-Kosten)

$$2.5.1 \text{ Kapitaldienst gemäß Position 2.4} = 130 \text{ Mio. DM/a}$$

$$2.5.2 \text{ Lohnkosten gemäß Position 2.3, abgerundet} = 2 \text{ Mio. DM/a}$$

$$= 132 \text{ Mio. DM/a}$$

$$132 \text{ Mio. DM/a} / 10^{10} \text{ Nm}^3 \text{ H}_2, \text{ ohne Rendite, ohne kalkulatorische Zinsen} = \underline{\underline{1,32 \text{ DPf./Nm}^3 \text{ H}_2}}$$

Bei 4% kalkulatorischen Zinsen auf 1.850 Mia. DM entstehen zusätzliche Kosten von 74,0 Mio. DM, diese bezogen auf den jährlichen Volumdurchfluß:

$$\frac{74,0 \text{ Mio. DM/a}}{10^{10} \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{a}} = 0,74 \text{ DPf./Nm}^3 \text{ H}_2 \quad \underline{\underline{0,74 \text{ DPf./Nm}^3 \text{ H}_2}}$$

Schlägt man ferner 8% Rendite hierauf, so entstehen weitere Belastungen hierauf von doppelten Beträgen, also  $8\% \times 1.850 \text{ Mia. DM} = 148,0 \text{ Mio. DM}$ .

Bezogen auf die jährliche Durchflußmenge sind dies

$$\frac{1,48,0 \text{ Mio. DM/a}}{10^{10} \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{a}} = \underline{\underline{1,48 \text{ DPf./Nm}^3 \text{ H}_2}}$$

Die Summe der laufenden Durchleitungskosten beträgt also  $= 3,54 \text{ DPf./Nm}^3 \text{ H}_2$  bei voller Anrechnung der finanztechnischen Belastungen.



## 2.1 Detaillierung der Kalkulation der Kompressorstation

### 2.1.1 Durchsatzmenge: $2,75 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h} = 2,75 \text{ GNm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$ .

Anfangsdruck: Atmosphärendruck; Enddruck: 100 bar.

Vorkompression mit 13 Achsial- und 7 Radialkompressoren mit Zwischenkühlung von 1–25 bar. Nachkompression mit Kolbenmaschinen mit Zwischenkühlung von 25–100 bar. Erforderliche Antriebsleistung für ein ideales Gas:  $2,75 \text{ Mio. Nm}^3/\text{h} = 0,20 \text{ kWh/Nm}^3$  = 550 MW

dazu Aufwand für geschlossenes Kühlwassersystem, Energiebedarf 25 MW

Energieaufwand insgesamt 575 MW

### 2.1.2 Investitionen für die Kompressorstation, Wert 1974

Kompressoren incl. betriebsbereiter Montage von 35 Maschinen 300 Mio. DM

Kühler, Rohrleitungen an den Maschinen incl. Montage 150 Mio. DM

Motoren oder Antriebsturbinen und elektrische Schaltanlagen 160 Mio. DM

Gebäude, Fundamente und Nebengebäude incl. Gelände und Aufschließung 150 Mio. DM

Kühlwasserversorgung, Rückkühlanlage und Wasserleitungssystem 110 Mio. DM

Unvorhergesehenes: 30 Mio. DM

insgesamt: 900 Mio. DM

### 2.1.3 Lohnkosten (s. a. 2.3)

4 Leitendes Personal à 120.000 DM/a 480.000 DM

20 Maschinisten (5 Mann × 4 Schichten) à 40.000 DM/a 800.000 DM

10 Reparaturpersonal à 40.000 DM/a 400.000 DM

10 Angestellte und Techniker à 70.000 DM/a 700.000 DM

2.380.000 DM

Aufgerundet auf 2.400.000 DM

### 2.1.4 Kapitaldienst

Kompressorstation, Lebensdauer 10–20 a, guter Mittelwert 15 a,  
incl. Gebäude und Fundamente

7% Abschreibung

3% Reparatur und Überwachung

1,5% Steuern und Versicherung

11,5% (ohne Rendite, ohne kalkulatorische Zinsen)

11,5% von 900 Mio. DM = 103,5 Mio. DM/a, aufgerundet 104 Mio. DM

### 2.1.5 Energiekosten

Energiebedarf einschl. Kühlwasser-Versorgung gemäß Pos. 2.1.1: 575 MW

Stromkosten angenommen mit 2 DPf./kWh

$\frac{575 \text{ MW} \times 2 \text{ DPf./Nm}^3 \times 1000 \times 8700 \text{ h/a}}{10^{10} \text{ Nm}^3/\text{a}} =$  abgerundet 1 DPf./Nm<sup>3</sup>

Hilfs- und Betriebsstoffe (Schmieröl, Chemikalien, usw.) 0,1 DPf./Nm<sup>3</sup>

$\frac{10 \text{ Mia. DM/a}}{10^{10} \text{ Nm}^3/\text{a}} = 0,1 \text{ DPf./Nm}^3$

**2.1.6 Gesamtkosten Kompression 1–100 bar**

2.1.6.1 Kapitaldienst gemäß Pos. 2.1.4

 $\frac{10^4 \text{ Mio. DM/a}}{10^{10} \text{ Nm}^3/\text{a}} =$ Insgesamt 1,1 DPf./Nm<sup>3</sup> $10^{10} \text{ Nm}^3/\text{a}$ 1.04 DPf./Nm<sup>3</sup>

2.1.6.2 Lohnkosten gemäß Pos. 2.1.3

 $\frac{2.4 \text{ Mio. DM/a}}{10^{10} \text{ Nm}^3/\text{a}}$  $= 0.024 \text{ DPf./Nm}^3$ 

2.1.6.3 Energiekosten gemäß Pos. 2.1.5

 $= \frac{1.1}{2.164} \text{ DPf./Nm}^3$ 

Kompressionskosten (ohne kalkul. Zinsen, ohne Rendite)

 $= 2.164 \text{ DPf./Nm}^3$ 

Bei 4% kalkulatorischen Zinsen von 900 Mio. DM

 $= 36 \text{ Mio. DM}$  $= \frac{0.36}{0.72} \text{ DPf./Nm}^3$ 

Bei 8% Rendite von 900 Mio. DM, zusätzlich:

 $= 72 \text{ Mio. DM}$  $= 0.72 \text{ DPf./Nm}^3$ 

Kompressionskosten incl. kalkul. Zinsen und Rendite

3.244 DPf./Nm<sup>3</sup>**Detaillierte Berechnung der H<sub>2</sub>-Rohrleitung von Huelva nach Karlsruhe  
für 10<sup>10</sup> Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/a Jahresförderung****1. Länge der Rohrleitung**

Die Länge der H<sub>2</sub>-Rohrleitung von Huelva bis Karlsruhe wurde unter Berücksichtigung von Gebirgszügen aus einer Reisekarte im Maßstab 1:2.500.000, aber ohne Berücksichtigung von Höhenunterschieden ermittelt zu  $L = 2150 \text{ km}$ .

**2. Fördermengen**

Die jährliche H<sub>2</sub>-Förderung sollte auftragsgemäß  $10^{10} \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{a}$  betragen und damit größenordnungsmäßig 10% des damaligen Stromverbrauchs der BRD entsprechen. Diese Jahresförderung entspricht einer stündlichen Lieferung von  $1.15 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$ , oder in SI-Einheiten  $1,15 \text{ G Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$ . Die H<sub>2</sub>-Elektrolyse durch die Sonnenenergie findet natürlich nur in den Sonnenscheinstunden statt, die wir für Südeuropa meist mit durchschnittlich 10 h/d anzunehmen pflegen, die aber in der bevorzugten Gegend von Huelva auf 12 h/d ansteigt, wo auch das benötigte kalte Kühlwasser zur Verfügung steht; wir haben schon früher darauf hingewiesen, daß hier das Küstenwasser nicht so sehr kalt ist, daß darüber ein feiner Nebel liegt, wie ihn der Ferienreisende beim Flug zu den Canarischen Inseln bis zur marokkanischen Küste sieht. Hiermit gepaart ist die Verfügbarkeit landwirtschaftlich minderwertiger und entsprechend billiger Grundstücke für die Sonnenstrahlenempfänger, also eine ziemlich einzigartige günstige Lage, wie zuerst von Justi (1) auf Grund der meteorologischen Beobachtungen einer spanischen Kommission unserer COMPLES festgestellt.

Da die H<sub>2</sub>-Erzeugung nur bei Tag stattfindet, muß die nächtliche Liefermenge bei den 12 täglichen Sonnenscheinstunden im Rohrleitungsnetz gespeichert werden.

Es ist vorgesehen, die Rohrleitung zwecks Optimierung durch 2 Druckhaltestationen in 3 Abschnitte aufzuteilen; wir werden aber später auch die Alternative ohne Druckhaltestationen durchrechnen.

Abschnitt I: 725 km von Huelva bzw. Gibraltar in Richtung Karlsruhe zur Druckhaltestation A in ND 100 (100 bar).

Abschnitt II: 725 km von Druckhaltestation A in Richtung Karlsruhe zur Druckhaltestation B in ND 64 (64 bar).

Abschnitt III: 700 km von Druckhaltestation B nach Karlsruhe in ND 40 (40 bar).

Während für die Berechnung des Abschnittes III nur die durchströmende stündliche Liefermenge von  $1,15 \text{ GNm}^3 \text{ H}_2$  angesetzt wird, soll im Abschnitt II während der 12 Tagesstunden noch  $\frac{1}{3}$  des Nachtverbrauches gespeichert werden, also  $12 \times 0,3833 \text{ GNm}^3/\text{h}$ .

Im Abschnitt I kommen für die Berechnung dann folgende Durchsatzmengen in Frage:

Stündliche Liefermenge Karlsruhe	1,15 $\text{GNm}^3/\text{h}$
Stündliche Speicherung Abschnitt II	0,3833 $\text{GNm}^3/\text{h}$
insgesamt	1,5333 $\text{GNm}^3/\text{h}$
zusätzlich während der 12 Tagesstunden noch $\frac{2}{3}$ des Nachtverbrauches als Speicherung	$12 \times 0,7666 \text{ GNm}^3/\text{h}$

### 3. Rohrmaterial

Nach den deutschen Standards DIN 2170 muß die Wandstärke S bei Fernleitungsrohren mindestens 0,01 d betragen. Da wir Rohre NW 1000 gewählt haben, muß deren **Mindestwandstärke** minimal 10 mm betragen. Als **Rohrwerkstoff** kommt nach DIN 17172 Stahl, nach API-Norm X 52, Streckgrenze =  $37 \text{ kg/mm}^2$ , und X 70, Streckgrenze  $49 \text{ kg/mm}^2$  in Frage. Man beachte, daß nach unserer Konzeption die Betriebsdaten derart sein sollen, daß keine Sonderstähle nach Zusammensetzung oder Abmessungen erforderlich werden und die Investitionen erhöhen, was noch Bockris (1) in Erwägung gezogen hatte. Zur Verlegung werden geschweißte Stahlrohre nach DIN 2458 vorgesehen, was bedeutet für

ND 100	Rohr $1016 \times 20 \text{ mm}$	aus Stahl X 70
ND 64	Rohr $1016 \times 12,5 \text{ mm}$	aus Stahl X 70
ND 40	Rohr $1016 \times 10 \text{ mm}$	aus Stahl X 52,

vergleiche hierzu unsere auf Seite 176 folgende Nachrechnung zu NW 1100.

### 4. Nachrechnung der Wandstärken der Stahlrohre

Bei der Nachrechnung der Wandstärken werden folgende Zeichen verwendet:

S	= Sicherheitsbeiwert = 1,7
V	= Schweißnahtfaktor = 1
C <sub>1</sub>	= Zuschlag für Wanddicken-Abweichungen

$C_2$  = Zuschlag für Korrosion

$K$  = Streckgrenze des Werkstoffes (s. o.)

$S = S_0 + C_1 + C_2$  (Wandstärke)

$$S_0 = \frac{d \cdot p \cdot S}{200 \cdot V \cdot K}$$

$$S_{0ND\ 100} = \frac{1016 \cdot 100 \cdot 1.7}{200 \cdot 1 \cdot 49} = 17.62 \quad \text{gewählt: } S = 20 \text{ mm}$$

$$S_{0ND\ 64} = \frac{1016 \cdot 64 \cdot 1.7}{200 \cdot 1 \cdot 49} = 11.28 \quad \text{gewählt: } S = 12.5 \text{ mm}$$

$$S_{0ND\ 40} = \frac{1016 \cdot 40 \cdot 1.7}{200 \cdot 1 \cdot 3.7} = 9.33 \quad \text{gewählt: } S = 10 \text{ mm}$$

### 5. Nachrechnung der Rohrdurchmesser. Optimierung der Fortleitungskosten

Eine Gasleitung muß derartig optimiert werden, daß bei gegebenem Durchsatz die Fortleitungskosten minimiert werden. Das ist mathematisch möglich, weil diese Kosten sich aus verschiedenen Summanden zusammensetzen, wie dem Energieaufwand für die Kompression einschl. Kapitaldienst und Wartung der Anlage, sowie dem Kapitaldienst für die Leitung. Das Minimum tritt konkret auf, weil der Energieaufwand mit zunehmendem Durchmesser abnimmt, der Kapitaldienst für die Rohrleitung aber zunimmt, wie Fig. 12 an einem Beispiel nach Knüfer (9) illustriert, das auch den Einfluß einer Zwischenkompression erkennen läßt. Die Abszisse gibt die Nennweiten von 0 bis 1000 mm an, die linke Ordinate die Transportkosten in DPf./Nm<sup>3</sup>/100 km, die rechte Ordinate die Transportkapazität in 10<sup>3</sup> Nm<sup>3</sup>. Das linke Kurvenpaar, darstellend die Transportkosten mit (oben) bzw. ohne Zwischenkompression (unten) läßt erkennen, wie bei etwa 30% Rohrerweiterung die Kosten etwa auf 1/3 absinken; die Transportkapazität steigt umgekehrt auf dieser Strecke etwa um 1/3 an infolge der Zwischenverdichtung. Für alle Nennweiten kann man ablesen, ob die Transportkapazitäts-Erhöhung durch Zwischenkompression eine Erhöhung oder Verminderung der Transportkosten je 10<sup>3</sup> Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> mit sich bringt. Interessant ist die Schärfe des Minimums bei etwa 500–600 mm Nennweite. Ohne weiter auf die Einzelheiten dieses außerhalb der uns interessierenden Rohrweiten liegenden Beispiels einzugehen, beschränken wir uns hier auf den Hinweis, wie praktisch wichtig die preislichen Wettbewerbschancen in der Optimierung einer so großen Investition sind; aber auch auf den Hinweis, daß die genaue Berechnung der Lage des Minimums nicht unbedingt wertvoll ist, weil die Lage des Minimums bei den dauernden Schwankungen sowohl der Kapitalkosten (von 1974 bis 1981 bis zu +80%) wie der Stromkosten (bis zur Verdreifachung) variiert. Man kann auch die Rohrweite nicht scharf optimieren, weil die Betriebsdrucke bei einer Speicherröhre mit so starken tageszeitlichen wie auch jahreszeitlichen Perioden schon definitionsgemäß nicht konstant sein können.

Wegen der Einzelheiten weisen wir auf einschlägige, im Literaturverzeichnis angegebene Veröffentlichungen hin; bei den Berechnungen benutzen wir die Monographie von Herning (10), die den Vorzug hat, Approximationsformeln ohne physi-

kalischen Sinn zu vermeiden und ausreichende theoretische Strenge mit Verständlichkeit für Praktiker zu verbinden.

## 6. Berechnung und Optimierung der Rohrdurchmesser

Wie in diesen Büchern auseinandergesetzt, kann man den Druckabfall längs einer Leitung mit expandierender völlig turbulenter Gasströmung berechnen aus der Kontinuitätsgleichung  $w \cdot \gamma = w_1 \gamma_1$  und aus der Isothermengleichung  $w \cdot P = w_1 P_1$ , wobei

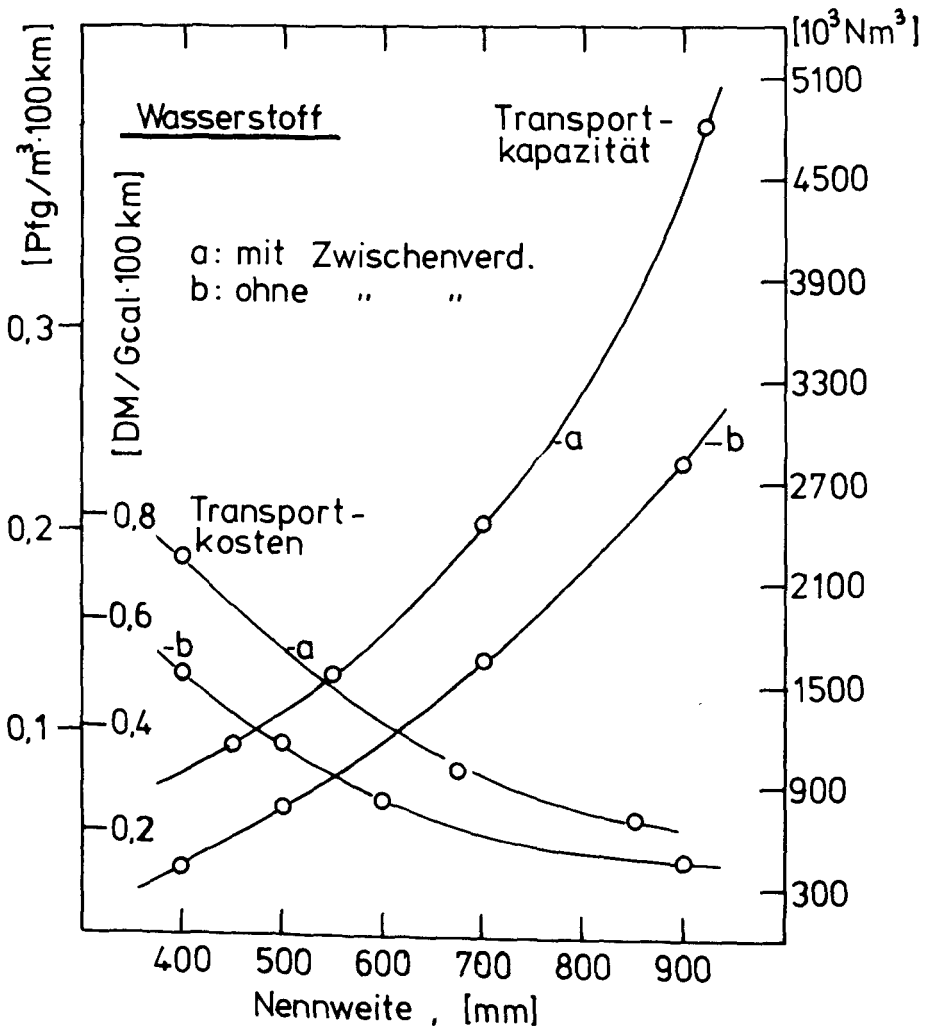


Fig. 12:  
Übertragungskosten für Wasserstoff.

alle zustandsabhängigen Größen zweckmäßig auf den Standardzustand bei 0°C und 760 Torr bezogen werden, so daß folgt

$$P_1 \gamma_1 w_1^2 = P_0 \gamma_0 w_0^2$$

und die Gleichung für den Druckabfall

$$\frac{P_1^2 - P_2^2}{2 P_0} = \lambda \frac{1}{d} \frac{w_0^2 \gamma_0}{2 g}.$$

In der Strömungslehre werden weiter noch nicht die SI-Einheiten benutzt, sondern z.B. bei Hochdruckfernleitungen die Drucke  $p$  in ata anstatt  $P$  in  $\text{kp/m}^2$ , und die Leitungslänge  $L$  in km ausgedrückt. Nach Einsetzen von  $p_0 = 1,033$  (= 760 Torr) und Einführung von  $V_0$  in  $\text{Nm}^3/\text{h}$  erhält man so

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{L} = 13,19 \frac{\lambda V_0^2 \gamma_0}{(100 d)^5},$$

wobei eine Fortleitungstemperatur von 0°C vorausgesetzt wird, der bei der hier herrschenden mittleren Fortleitungstemperatur von 12°C durch Multiplikation mit dem Temperaturverhältnis 285/273 Rechnung getragen wird. So gilt

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{L} = 13,8 \frac{\lambda V_0^2 \gamma_0}{(100 d)^5}.$$

Wir stellen nachfolgend nochmals alle Zeichen zusammen, wie sie anschließend benutzt werden:

- $p_1, p_2$  = absoluter Druck des  $\text{H}_2$  am Anfang bzw. Ende des betrachteten Rohrabschnitts
- $L$  = Länge der  $\text{H}_2$ -Leitung in km
- $d$  = Rohrdurchmesser in m
- $V_0$  = Volumdurchfluß in  $\text{Nm}^3/\text{h}$
- $\gamma_0$  = Normwichte des  $\text{H}_2$  in  $\text{kp/Nm}^3$
- $\lambda$  = Rohrreibungszahl

Die Rohrreibungszahl ist an sich eine komplizierte Funktion der Reynolds-Zahl  $Re$  und der relativen Rauigkeit  $k/d = 0,014$ ; vereinfachend können wir benutzen, daß bei rauhen Rohren und hohen Reynolds-Zahlen  $Re = \eta \gamma d / \eta g = \text{const } d$  ( $\eta$  = dynamische Viskosität) der Einfluß von  $Re$  verschwindet. So handelt es sich um eine elementare Zahlenrechnung, die wir einmal in aller Breite für den Rohrabschnitt I zwischen Gibraltar und Druckhaltestation A mit einer weit oberhalb des kritischen Wertes liegenden Reynoldszahlenwertes  $Re = 7595425$  sowie  $L = 725$  km durchführen wollen.

$$p_G^2 - p_A^2 = 725 \times 13,18 \frac{0,014 (1,9166 \cdot 10^2) \times 0,09}{(100 \times 0,976)^5} \times \frac{288^\circ}{273^\circ} = 5272.$$

Hieraus und aus dem Rohrdurchmesser des 1. Abschnittes folgt der Anfangsdruck zu

$$p_A = \sqrt{101^2 - 5272} = \sqrt{4929} = 70,2 \text{ ata}.$$

Das geometrische Volumen des Rohrabschnittes I ist  $0,976 \times \pi \times 725\,000/4 = 542\,082 \text{ m}^3$ , woraus die notwendige Speichermenge zu  $0,76666 \times 10^6 \times 12 = 9\,199\,200 \text{ m}^3$  folgt.

Nach 12 h Sonnenschein wird sich der Druck im Rohrabschnitt I ausgleichen gemäß

$$p_{\text{ml}} = (p_{\text{G}} + p_{\text{A}})/2 = (101 + 70,2)/2 = 85,6 \text{ ata.}$$

Der erforderliche Speicherdruck beträgt dann

$$V_{\text{sl}} = \text{Speichermenge/geometrisches Volumen} = 9\,199\,200/542\,082 = 16,97 \text{ ata,}$$

was bedeutet, daß der Druck beträgt

$$\begin{aligned} \text{abends } p_{\text{ml}} &= 85,6 \text{ ata} \\ \text{morgens } p_{\text{ml}} &= 68,63 \text{ ata.} \end{aligned}$$

Die stündliche Durchsatzmenge beträgt **nachts**

$$\begin{aligned} \text{am Rohranfang} & \quad 0 \quad \text{Nm}^3/\text{h,} \\ \text{und am Ende} & \quad 0,7666 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h,} \\ \text{im Durchschnitt also } V_{\text{ml}} & \quad 0,3833 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h.} \end{aligned}$$

Die Druckabfallberechnung für den Nachtbetrieb beim niedrigsten Vordruck von 68,3 ata wird nach dem obigen Beispiel für den 1. Rohrabschnitt zahlenmäßig berechnet zu  $p_{\text{ml}}^2 - p_{\text{A}}^2 = 218,4$ ;  $p_{\text{A}} = \sqrt{68,63^2 - 218,4} = 67,02 \text{ ata.}$

### Abschnitt IIa der Speicherröhre

Nach demselben Schema berechnen wir zahlenmäßig die Betriebsdaten dieses Rohrabschnittes, der wiederum aus Rohren NW 1000 von  $L = 725 \text{ km}$  Länge zusammengesetzt ist und für den wir versuchsweise den Druck bei der Haltestation A zu  $p = 64 \text{ ata}$  ansetzen. Die mittlere Durchströmungsmenge ist dann  $V_{\text{mII}} = 1,15 \cdot 10^6 + 0,3833 \cdot 10^6/2 \text{ Nm}^3/\text{h} = 1,3416 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h}$ . Dann ergibt sich der Druckabfall im Rohrabschnitt II zu  $p_{\text{A}}^2 - p_{\text{B}}^2 = 2392,86$ , und der Druck am Rohrende zu  $p_{\text{B}} = \sqrt{65^2 - 2393} = \sqrt{1832} = 42,8 \text{ ata}$ . Das geometrische Volumen des Abschnittes II beträgt  $0,991^2 \pi \text{ mal } 725\,000/4 = 558\,830 \text{ m}^3$ , woraus wir die erforderliche Speichermenge berechnen zu  $0,3833 \cdot 10^6 \cdot 12 = 4\,559\,600 \text{ Nm}^3$ . Wie oben im Rohrabschnitt I wird nach Beendigung der Tagesförderung der  $\text{H}_2$ -Druck im Abschnitt II sich ausgleichen gemäß  $p_{\text{mII}} = (p_{\text{A}} + p_{\text{B}})/2 = (65 + 42,8)/2 = 53,9 \text{ ata}$ . Der hierzu passende Speicherdruck beträgt dann  $p_{\text{slII}} = \text{Speichermenge/geometrisches Volumen} = 4\,599\,600/558\,830 = 8,23 \text{ ata}$ . Wir berechnen wiederum wie oben für den Rohrabschnitt I die tageszeitlichen Druckschwankungen für Rohrabschnitt II zwischen Druckhaltestation A und B: Der mittlere  $\text{H}_2$ -Druck beträgt also abends  $p_{\text{mII}} = 53,9 \text{ ata}$ , morgens  $p_{\text{mII}} = 45,67 \text{ ata}$ . In diesem Abschnitt ist die stündliche Durchsatzmenge nachts am Anfang A:  $0,7666 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , am Ende B:  $1,15 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , im nächtlichen Durchschnitt also  $V_{\text{mII}} = 0,9583 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h}$ .

### Druckabfallberechnung für den Nachtbetrieb bei niedrigstem Vordruck 45,67 ata

Hierzu setzen wir nach den obigen Mustern wieder Zahlenwerte in die Druckabfallgleichung ein, wiederum mit einer Rohrrauigkeit von  $\lambda = 0,014$  bei einem hohen Re-Wert (3 740 229) und finden für  $p_{\text{mII}}^2 - p_B^2 = 1220,57$ ; daraus folgt der niederste Vordruck am Rohrende B  $p_B = \sqrt{45,67^2 - 1220,57} = \sqrt{865,18} = 29,4$  ata. Dieser Druck reicht offenbar nicht aus, um den folgenden Abschnitt III vor der Endstation K = Karlsruhe mit 40 ata zu betreiben, es sei denn, wir wählen hier einen größeren Durchmesser, wie NW 1200, ND 25, also Rohr 1220×12 mm aus Stahl X 50.

### Berechnung von Rohrabschnitt IIIa

Dieser Rohrabschnitt sollte eine Länge von nur 700 km haben, und seine Durchströmungsgeschwindigkeit beträgt bei  $p = 25$  ata  $V = 1,15 \cdot 10^6$  Nm<sup>3</sup>/h. Dann gilt  $p_B^2 - p_K^2 = 665$ ;  $p_K = \sqrt{26^2 - 665} = \sqrt{11} = 3,3$  ata. Da dieser Druckwert trotz der bereits vergrößerten Rohrweite NW 1200 zu gering ist, wählen wir versuchsweise ein noch weiteres Rohr, nämlich NW 1400, also Rohr 1420×14,2 mm. Dann wird  $p_B^2 - p_K^2 = 310,67$ , und  $p_K = \sqrt{26^2 - 310,67} = 19,11$  ata.

Diese Unstimmigkeiten veranlassen uns, die Dimensionierung des Rohres in Abschnitt II, also zwischen den Druckhaltestationen A und B nochmals zu variieren, und die Bezeichnungen IIa und IIb für die Varianten zu wählen. Für IIb wählen wir statt NW 1000 das Rohr NW 1120, mit den Abmessungen 1120×14,2 mm.  $p_{A2}$  bleibt unverändert 64 atü, und  $L = 725$  km. Dann wird  $V_{\text{mII}} 1,13416$  Nm<sup>3</sup>/h, und  $p_A^2 - p_B^2 = 1475,83$ ;  $p_B = \sqrt{65^2 - 1475,83} = 52,4$  ata. Das geometrische Volumen des Rohrabschnittes IIb wird dann  $1,0916^2 \times \pi \times 725\,000/4 = 678\,092$  m<sup>3</sup>. Die Speicherung erfordert eine Menge von  $0,3833 \cdot 10^6 \times 12 = 4\,599\,600$  Nm<sup>3</sup>. Wie wir schon gesehen haben, wird sich der Druck im Rohrabschnitt IIb nach Sonnenuntergang ausgleichen gemäß  $p_{\text{mII}} = (p_A + p_B)/2 = (65 + 52,4)/2 = 58,7$  ata. Der sich hierbei einstellende Speicherdruck beträgt:

$$S_{\text{II}} = \text{Speichermenge} / \text{geometrisches Volumen} = (4\,599\,600) / (678\,092) = 6,78 \text{ ata.}$$

Das bedeutet, daß der mittlere Druck nunmehr beträgt abends  $p_{\text{mII}} = 58,7$  ata, morgens  $p_{\text{mII}} = 58,7 - 6,78 = 51,92$  ata; die mittlere Durchsatzmenge ist, wie schon oben unter IIa berechnet,  $0,95833 \cdot 10^6$  Nm<sup>3</sup>/h. Die Druckabfallberechnung für den Nachtbetrieb beim niedrigsten Vordruck ermittelt man wieder nach bekanntem Muster zu  $p_{\text{mII}}^2 - p_B^2 = 752,52$ , und daraus  $p_B = \sqrt{51,92^2 - 752,52} = \sqrt{1943} = 44,1$  ata: ein sehr günstiger Wert!

### Nachoptimierung von Rohrabschnitt IIIb

Diese Verbesserung durch die Nachoptimierung von Rohrabschnitt IIa ermutigt uns, auch die Rohrweite von IIIb zu variieren, indem wir NW 1000 nehmen, den Betriebsdruck am Punkte B zu  $p_B = 40$  ata ansetzen, und die Durchströmungsmenge



zu  $1,15 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h}$ . Dann wird  $p_B - p_K = 1655,85$ , und  $p_K = \sqrt{41^2 - 1655,85} = 5,015$  ata. Dieser Druckwert ist offenbar zu niedrig, weshalb wir noch einmal mit NW 1100-Rohren, also  $1120 \times 11 \text{ mm}$ -Rohren aus X 50 probieren. Man erhält so  $p_B^2 - p_K^2 = 1017$ , und  $p_K = \sqrt{41^2 - 1017} = 25,7$  ata – ein sehr passender Druck!

### Diskussion der Berechnungsergebnisse

Diese hier wiedergegebenen Zahlenrechnungen sind wegen ihrer Detaillierung etwas ermüdend und unübersichtlich; es ist aber ihr Zweck, so ausführlich zu sein, um überzeugend nachzuweisen, daß und wieso der Energietransport über  $\text{H}_2$ -Gas-Hochdruckpipelines wirtschaftlich und durchaus konkurrenzfähig ist, was bisher von Vertretern anderer Zweige der Technik nicht immer geglaubt wurde. Nachdem dieser Nachweis streng und gründlich nachprüfbar vorliegt, wollen wir eine leicht übersehbare Synopsis präsentieren.

Tab. 1 enthält in 11 Zeilen und 10 Spalten eine übersichtliche Zusammenstellung aller durchgerechneten Varianten, von denen die als optimal befundenen durch Ankreuzung hervorgehoben sind. Man erkennt, daß die Einspeisedrucke  $P$  bei den als Bestwerten anerkannten NW- und ND-Werten mit ca. 101 ata  $\text{H}_2$ -Anfangsdruck im Rohrabschnitt I, mit 65 ata im Rohrabschnitt IIb und mit 41 ata im Rohrabschnitt IIIb sich dem gewünschten Gesamtverlauf bestens anpassen; in derselben Reihenfolge betragen die  $P_{\min}$ -Mindestwerte am Ende dieser Abschnitte beziehentlich 67, 44,08 und 25,7 ata. Die optimierten Rohrweiten sind beziehentlich 1000, 1100 und 1400 NW, und sie wiegen beziehentlich im Abschnitt I  $363 \cdot 10^3 \text{ to.}$ , im Abschnitt II  $284 \cdot 10^3 \text{ to.}$  und im Abschnitt III  $212 \cdot 10^3 \text{ to.}$ , zusammen  $860 \cdot 10^3 \text{ to.}$ , eine durchaus akzeptable Menge, die sogar teure Spezialstähle vermeidet.

Bemerkenswert ist auch die Zusammenfassung im Diagramm Fig. 13, weil es auch das Zusammenspiel zwischen gespeicherten und transportierten  $\text{H}_2$ -Mengen bei Tag- und Nachtbetrieb mit einem Blick auch quantitativ erkennen läßt – ein überraschender und bisher noch nie so anschaulicher Aspekt der Solar- $\text{H}_2$ -Wirtschaft.

**Tabelle 1**  
*Auswertung der Nachrechnung*

Abschnitt	NW	ND	p Einspeis. ata	p max Ende ata	p min Ende ata	Rohr mm	Werkstoff	Länge km	Gewicht to.	gewählte Ausführung
I	1000	100	101	85,6	67	1016 × 20	X 70	725	363101	X
II a)	1000	64	65	53,9	29,4	1016 × 12,5	X 70	725	226511	
II b)	1100	63	65	58,7	44,08	1120 × 14,2	X 70	725	283993	X
III a)	1200	25	26		3,3	1220 × 12,5	X 52	700		
	1400	25	26		19,11	1420 × 14,2	X 52	700	347833	
III b)	1000	40	41		5,01	1016 × 10	X 52	700		
	1100	40	41		25,7	1120 × 11	X 52	700	212107	X

Als Ergänzung der anschaulichen Darstellung zählt Tab. 2 aufgeschlüsselt für die 3 Rohrabschnitte die Kosten auf, die mit Stand 1973 kalkuliert waren und sich einschließlich 10% Zuschlag für Unvorhergesehenes, aber ausschließlich den prozentual vernachlässigbar geringen Aufwendungen für die beiden Druckhaltestationen auf ca.  $1,85 \cdot 10^9$  DM belaufen. Gegenwärtig, im Jahr 1981, sind die Preise für Stahlbau und die Personalaufwendungen um höchstens 80% gestiegen, was aber für Kostenvergleiche keine Rolle spielt, weil es etwa dieselben wie für eine elektrische Fernleitung sind. Tab. 3 ist eine die Investitionskosten, Personalkosten, Kapitalkosten bei angenommenen 25 Jahren Lebensdauer und finanztechnische laufende Kosten (kalkulatorische Zinsen und Rendite) umfassende Aufstellung. Die dann folgende Tab. 4 betrifft die Kalkulation der Haupt-Kompressoranlage bei Huelva, aufgeteilt nach laufenden Lohnkosten, dem Kapitalbedarf, den laufenden Energiekosten und die Addition von diesen, wonach diese einschließlich Rendite und kalkulatorischen Zinsen, aber ohne den solartechnischen Teil vor Beginn der Pipeline  $3,24 \text{ DPf./Nm}^3$ , also rund  $1,7 \text{ DPf./kWh}$  ausmachen, Stand wiederum 1973; das ist ungefähr soviel wie die kWh aus konventionellen Kraftwerken. Die komplette Berechnung sollte natürlich auch den solartechnischen Teil einschließen, die ohne sichere Vorbilder ist, da ja die Primärenergie als solarer Herkunft gratis ist, dafür aber die Investitionskosten höher – ähnlich wie bei Nuklearenergie. Nachdem aber kürzlich das aus 3 ver-

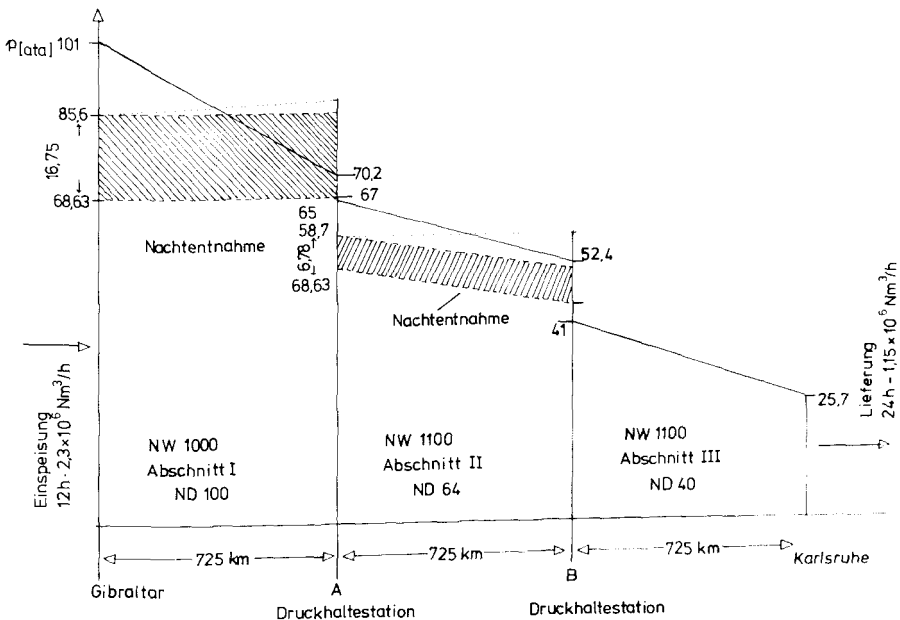


Fig. 13:  
Quantifiziertes Diagramm der dreiteiligen Druckspeicherröhre  
einschließlich Druckabfallberechnung bei Nachtentnahme.

schiedenen Teilanlagen bestehende Solarkraftwerk bei Almeria in Betrieb genommen ist (Fig. 14), werden wir in wenigen Jahren auch darüber genauere Unterlagen besitzen.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang der neuerliche Hinweis von Kipker (5), daß die Strömungseigenschaften von  $H_2$ -Gas soviel besser sind als die des Erdgases nach Fig. 5, daß man auf dem über 2000 km langen Weg der  $H_2$ -Stahlröhre außer der Hauptkompressorstation überhaupt keiner Zwischenkompressoren bedarf, dagegen 1–2 zum  $CH_4$ -Betrieb. In diesem Zusammenhang beantwortet Kipker auch die Frage, ob man die bei der elektrolytischen Herstellung des  $H_2$  abfallenden 50 Vol. %  $O_2$  auffangen und verwerten soll? Tatsächlich sind die physikalischen Daten des  $O_2$  (Viskosität, Dichte usw.) soviel ungünstiger als beim  $H_2$ , daß man für die ca. 2000 km etwa 6–8 Druckhaltestationen brauchte. Andererseits wurde schon im historischen Block-

**Tabelle 2**  
*Kosten der Rohrleitung*

	Länge km	DM m-Preis	Gesamt- preis kDM
<b>Abschnitt I</b>			
Rohrmaterial 363101 to.	725		381256
Rohrverlegungen und Erdarbeiten			
leichte Trasse	290	320	92800
normale Trasse	285	400	114000
schwere Trasse	150	500	75000
<b>Abschnitt II</b>			
Rohrmaterial 283993 to.	725		298193
Rohrverlegungen und Erdarbeiten			
leichte Trasse	270	200	54000
normale Trasse	360	300	108000
schwere Trasse	95	400	38000
<b>Abschnitt III</b>			
Rohrmaterial 121107 to.	700		212107
Rohrverlegungen und Erdarbeiten			
leichte Trasse	300	200	60000
normale Trasse	350	250	86500
schwere Trasse	50	330	16500
Steuerkabel mit Zubehör	725	25	18125
Entschädigungen	725	40	29000
Korrosionsschutz, Prüfungen	725	10	7250
Flußkreuzungen			50000
Ingenieurarbeiten	725	40	29000
			1670731
10% Unvorhergesehenes			167073
	2150	854,80	1837804

diagramm einer Wasserstoffwirtschaft (Fig. 15) von 1964 (3) und auch im Vergleichsbild zwischen Hochspannungs- und Pipeline-Transport eine 2. Stahlröhre halben Querschnitts neben der  $H_2$ -Druckröhre eingezeichnet (Fig. 1), die mit dem nicht allein finanziell zu bewertenden Nutzen eines  $O_2$ -Importes hierher begründet wurde:  $O_2$  ist vielfach nützlich, in der gegenwärtigen Krise der Stahlwerke sogar ein Retter, generell zum Anschluß an die vorhandenen  $O_2$ -Leitungen des Ruhrgebietes prädestiniert und schließlich für die Regenerierung unserer verjauchten und vergifteten Flüsse (Rhein!) vielleicht unbezahlbar. Kipker rechnet aus, bis zu welcher Entfernung eine begleitende  $O_2$ -Pipeline noch einen Bonus zur Kostensenkung des  $H_2$ -Preises abwirft; tatsächlich würde dieser durch eine Stahlleitung NW 600 zu dem erwähnten  $O_2$ -Rohrleitungsverbund mindestens eine Zwischenverdichtung erfordern (vielleicht auch 6–8), wobei nach Abzug der Durchleitungskosten noch ein Erlös von ca. 4 DPf./Nm<sup>3</sup> übrig bliebe; Kipker geht davon aus, daß der  $H_2$  frei Verbraucher etwa 15 DPf./Nm<sup>3</sup> kosten würde, so daß die genannten 2 DPf./Nm<sup>3</sup>  $O_2$  einen Bonus von ca. 15 % für den  $H_2$  ausmachen würde.

Andererseits ist es dem Fachmann, weniger dem Laien bekannt, daß der Umgang mit Pipeline- $O_2$  durchaus unerfreulicher als bei  $H_2$  ist, da der konzentrierte  $O_2$  in den nie ganz reinen Stahlröhren alle paar Jahre Brände verursacht. Insofern wäre es auch erwägenswert, nach dem Muster der Verschiffung von verflüssigtem Erdgas Flüssig- $O_2$  in den Häfen nahe Huelva und Almeria auf Tiefkühlschiffe einzutanken ( $T_s$  von  $CH_4$  112 K, von  $O_2$  90 K) und so billig nach Wilhelmshaven zu verfrachten.

Über diese durchaus realistischen Sparideen darf man auch nicht den Vorschlag von Justi (1974) vergessen, den mit ca. 100 ata in die Transportröhre eingeleiteten  $H_2$

Tabelle 3

*$H_2$ -Transport- und Speicherröhre 1973 – Kalkulation der Messer-Griesheim-GmbH*

### Investitionskosten

2150 km geschweißte Rohrleitung incl. aller Nebenkosten für  
Betriebsüberwachung und Verwaltungsbauten 1850 MDM

### Personalkosten

2,1 MDM/a

### Kapitaldienst bei 25 a Lebensdauer

4% Abschreibung

1,5% Reparaturen

1,5% Steuern und Versicherung

Sa. 7,0% von 1850 MDM 130 MDM/a

Personalkosten und Kapitaldienst =  $\frac{132,1 \text{ MDM/a}}{10^{10} \text{ Nm}^3/\text{a}} = 1,32 \text{ DPf./Nm}^3$   
Jährlicher  $H_2$ -Durchsatz

### Finanztechnik

Kalkulatorische Zinsen, 4% von 1850 MDM 0,74 DPf.

Rendite, 8% von 1850 MDM 1,48 DPf.

Gesamt-Durchleitungskosten im ungünstigsten Fall 3,54 DPf./Nm<sup>3</sup>

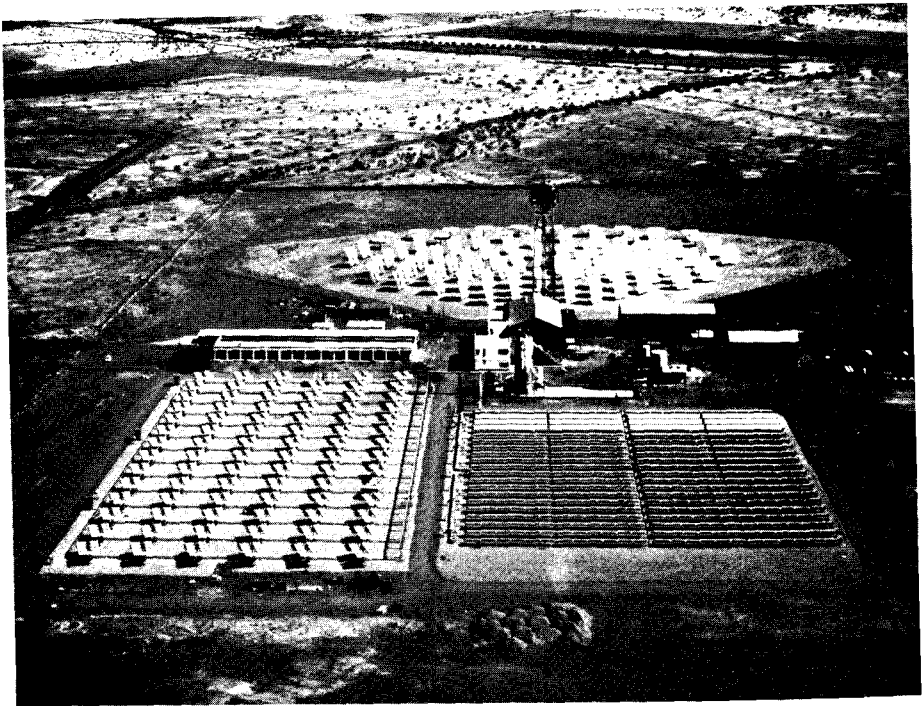


Fig. 14:

Luftaufnahme des neuen Europäischen Solarkraftwerkes bei Almeria (Südspanien). Die Versuchs- und Demonstrationsanlage besteht aus  $3 \times$  je  $0,5 \text{ MW}_d$  Teilen: Im Hintergrund die Teilanlage nach dem Tower-Power-Prinzip mit mehreren 100 durch Kleincomputer nachgeführten Konvexspiegeln, System Martin-Marietta (vgl. Abb. 8.20 in (1)), die ihre Strahlen auf den schwarzen „Receiver“ auf dem 50 m hohen Turm konzentrieren und über einen Na-Wärmekreislauf auf eine Turbine übertragen. Im Vordergrund zwei verschiedene Anlagen nach dem Farmprinzip mit parabolischen linearen Hohlspiegeln, die nur in einer Koordinate nachgeführt werden.

(Foto: FAZ vom 22. Sept. 1981)

Tabelle 4

Verdichterstation – Kalkulation von MGG

**1.) Verdichterleistung:  $2,75 \text{ GNm}^3/\text{h}$**

Anfangsdruck: Atmosphärendruck; Enddruck: 100 bar

Vorverdichtung mit Achsial- und Radialverdichtern

(13- und 7-stufige Maschinen) mit Zwischenkühlung von 1–25 bar

Erforderliche Antriebsleistung:  $2,75 \text{ GNm}^3/\text{h} \times 0,20 \text{ kWh/Nm}^3 =$

550 MW

Geschlossenes Kühlwassersystem, Energiebedarf:

25 MW

Energiebedarf insgesamt

575 MW

**2.) Investitionen der Verdichterstation**

Verdichter einschl. betriebsbereiter Montage (35 Maschinen)	300 MDM
Kühler, Rohrleitungen an den Maschinen, einschl. Montage	150 MDM
Motoren und Antriebsturbinen und elektrische Schaltanlagen	160 MDM
Gebäude, Fundamente und Nebengebäude einschl. Gelände und Geländeerschließung	150 MDM
Kühlwasserversorgung, Rückkühlanlage und Wasserleitungssystem	110 MDM
Unvorhergesehenes	30 MDM
Investitionen insgesamt	900 MDM

**3.) Lohnkosten**

4 Leitendes Personal à 120.000 DM/a	480 kDM
20 Maschinisten (5 Mann × 4 Schichten) à 40.000 DM/a	800 kDM
10 Reparaturpersonal à 40.000 DM/a	400 kDM
10 Angestellte und Techniker à 70.000 DM/a	700 kDM
Aufgerundet insgesamt	2400 kDM

**4.) Kapitalbedarf**

Verdichterstation, angenommene Lebensdauer 10–20 Jahre; einschließlich Gebäuden und Fundamenten als Mittelwert 15 Jahre angesetzt

7% Abschreibung

3% Reparatur und Überwachung

1,5% Steuern und Versicherung

11,5% (ohne Rendite, ohne kalkulatorische Zinsen von 900 MDM)

aufgerundet

104 MDM

**5.) Energiekosten**

Energiebedarf einschl. Kühlwasserversorgung gemäß Pos. 1.) 575 MW.

Stromkosten angenommen mit 2 DPf./kWh.

$575 \text{ MW} \times 2 \text{ DPf./kWh} \times 1000 \times 8700 \text{ h/a} / 10^{10} \text{ Nm}^3/\text{a}$  1,0 DPf./Nm<sup>3</sup>

Hilfs- und Betriebsstoffe (Schmieröl, Chemikalien etc.).

$10 \text{ GDM/a} / 10^{10} \text{ Nm}^3/\text{a} = 0,1 \text{ DPf./Nm}^3$  0,1 DPf./Nm<sup>3</sup>

Energie und Hilfsstoffe insgesamt 1,1 DPf./Nm<sup>3</sup>

**6.) Gesamtkosten Verdichtung 1–100 bar**

a.) Kapitaldienst gemäß Pos. 4.)  $104 \text{ MDM/a} / 10^4 \text{ GNm}^3 =$  1,04 DPf./Nm<sup>3</sup>

b.) Lohnkosten gemäß Pos. 3.)  $2,4 \text{ MDM/a} / 10^4 \text{ GNm}^3/\text{a} =$  0,024 DPf./Nm<sup>3</sup>

c.) Energiekosten gemäß Pos. 5.) = 1,1 DPf./Nm<sup>3</sup>

Verdichterkosten ohne kalkulatorische Kosten und Rendite 2,164 DPf./Nm<sup>3</sup>

Dazu 4% kalkulatorische Kosten von 900 MDM = 36 MDM 0,36 DPf./Nm<sup>3</sup>

und 8% Rendite von 900 MDM = 72 MDM 0,72 DPf./Nm<sup>3</sup>

Gesamtkosten Verdichtung zuzügl. kalkulatorische Kosten und Rendite 3,24 DPf./Nm<sup>3</sup>

an deren Ende mit mittlerem Druck zu entnehmen und vor dem Verbrauch auf Niederdruck arbeitsleistend in einer Turbine zu entspannen (Fig. 16). Dem Thermodynamiker ist ja bekannt, daß der Energieaufwand der Kompression nicht proportional der Druckdifferenz  $100-1$ , sondern dem Logarithmus des Druckverhältnisses ist; nun ist der  $\log(100/1) = 2,00$ , der  $\log(40/1) = 1,60$ , so daß man im Falle der voll umkehrbaren Entspannung idealiter  $(1,60)/(2,00) = 80\%$  der spanischen Solar-Kompressionsenergie in Deutschland als Entspannungsarbeit wiedergewinnen könnte, vorzugsweise als elektrische Energie; bei 60% mechanischem Wirkungsgrad der Expansionsmaschine und der bekannt superidealen Zustandsgleichung des Wasserstoff-Gases sind immerhin  $80 \times 60 = 48\%$  Rückgewinn der spanischen Solarenergie in Deutschland möglich – eine interessante Verbilligung der Solar-H<sub>2</sub>-Wirtschaft!

Bei ausführlicher Darstellung unserer H<sub>2</sub>-Druckgas-Technologie werden wir oft nach einer vergleichenden Bewertung des Fernwärme-Transportes „Adam und Eva“

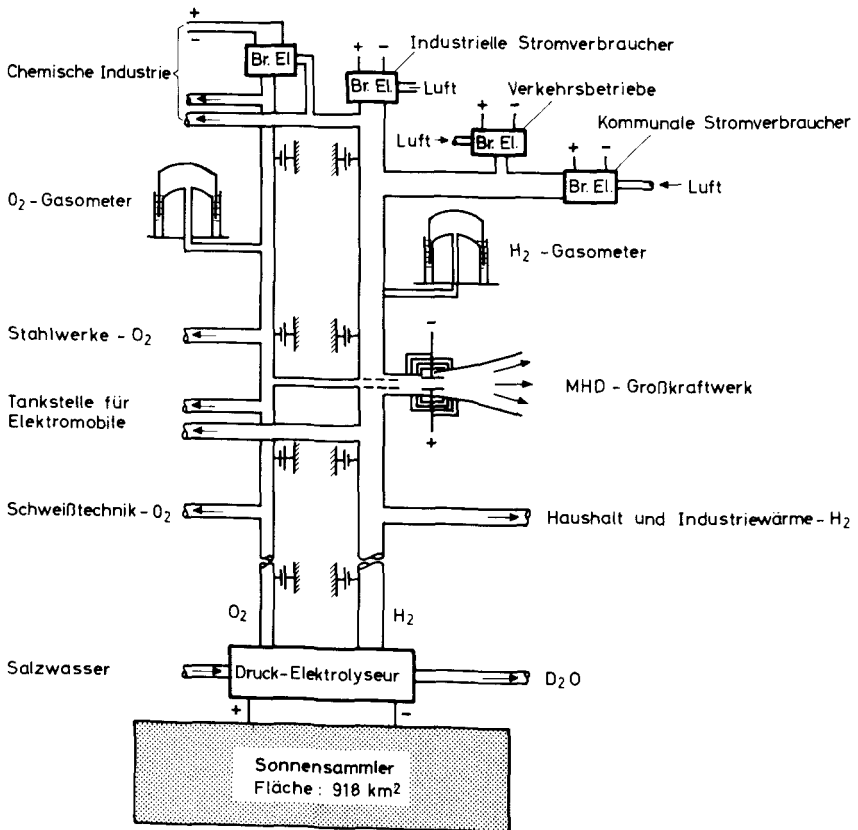


Fig. 15:

Bereits das erste quantifizierte Blockschema einer solaren H<sub>2</sub>-Wirtschaft von Justi aus dem Jahre 1964 enthält alle wesentlichen Merkmale.

von Schulten u.M. gefragt. Die zu verteilende hoch- und mittel-temperierte Wärme soll aus einem Hochtemperaturreaktor (HTR) kommen und zuerst in einem Stahlreaktor mit Rohrbündel-Wärmeaustauschern und Ni-Katalysatoren ein Gasgemisch aus  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ -Dampf durch **endotherme** Reaktion mit 205 kJ/mol entmethanisieren in  $\rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$ , wobei sich das Reaktionsprodukt etwas abkühlt und mit verminderten Wärmeverlusten durch eine Druckrohrleitung an den Wärmebedarfsort

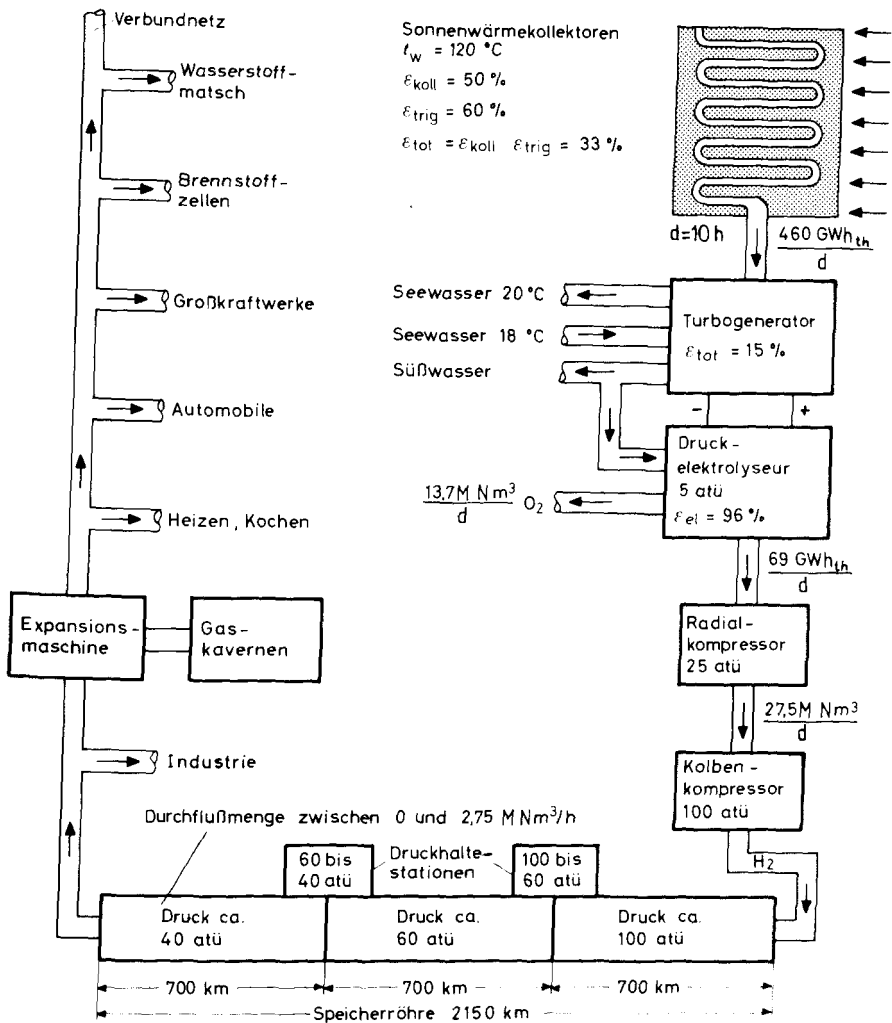


Fig. 16:

Blockschema einer Solar-Wasserstoffwirtschaft gemäß einer Offertstudie der Fa. Messer-Griesheim aus dem Jahre 1974.



geleitet wird. Dort gelangt es in einen zweiten Reaktor, wo die methanisierende Rückreaktion  $\text{CO} + 3 \text{H}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O}_{\text{Dampf}} + 205 \text{ kJ/mol}$  **exotherm** die gewünschte Nutzwärme abliefern; beide Reaktionen werden auch durch den jeweiligen Druck mitgesteuert. Das methanisierte Gasgemisch strömt dann durch eine zweite Druckleitung in den 1. Reaktor zum dauernden Kreislauf. Vergleicht man die Fotos der Versuchsanlage (11) mit dem der „natürlichen Ordnung“, so beginnt man erst recht deren geniale Einfachheit zu begreifen: man benötigt für  $\text{H}_2$  keine geschlossene Rückleitung, keine 2 Hochtemperatur-Apparate, keinen Helium-Kreislauf für  $950^\circ$ , nicht nur verminderte, sondern überhaupt keine Wärmeverluste und an Zahl und Qualifikation nur einen Bruchteil des Bedienungspersonals; auch ohne detaillierte quantitative Diskussion ist die Überlegenheit des  $\text{H}_2$ -Transport- und Speicherrohres dem „Adam & Eva“ evident.

### Literatur

- (1) J.O.M. Bockris u. E. Justi: „Wasserstoff-Energie für alle Zeiten. Konzept einer Sonnen-Wasserstoff-Wirtschaft“. München 1980, Pfiemer-Verlag. – E. Justi: „Sonnenenergie – die dritte Energiemacht?“. Akad. d. Wiss. u. d. Lit. Mainz 1949–1974, S. 42–53. Wiesbaden 1974, Verlag Steiner.
- (2) G.M. Woodwell: Sci. Amer. **238**, 1978, Nr. 1, S. 34–44.
- (3) E. Justi u. A. Winsel: „Kalte Verbrennung – Fuel Cells“. Wiesbaden 1962, Steiner Verlag. – E. Justi: „Leitungsmechanismus und Energieumwandlung in Festkörpern“. Göttingen 1965, Verlag Vandenhoeck u. Ruprecht. Vgl. auch (1), Kap. 7 u. 11.
- (4) D.P. Gregory: „A Hydrogen Economy“, Sci. Am. **228**, 1973, Nr. 1, S. 13–21; do. „THEME“, 1971, March 1971, Miami Beach, Conf. Paper. – „Hydrogen for Energy Distribution“, Symp. Paper, spons. by Inst. of Gas Technol. Chicago 1978.
- (5) Chr. Isting u. B. Thier: „Der Lichtbogen“ **24**, Nr. 176 (1975), S. 16–20. – Chr. Isting: „Erfahrungen mit einem Pipelineverbundnetz für Wasserstoff“. 3R Internat. Nr. 6 (1974), S. 1–8. Essen 1974, Verlag HdT.
- (6) E. Justi: „Konzeption, Stand und Aussichten der Wasserstoffwirtschaft“ etz **102** (1981), Nr. 2, S. 68–73.
- (7) C. Tellier: „Application of axial flow compressors for long distance pipeline transmission of hydrogen“. Int. J. Hydr. Energy, **6**, Nr. 4, S. 413–422, 1981; do. privates Suppl. an die 2. Intern. Conf. über Wasserstoff. Zürich, August 1978: „Hydrogen Recompression for Pipeline Transmission“.
- (8) Messer-Griesheim Industriegase GmbH, Düsseldorf, Autoren: Kl. Baumgärtner u. R. Kipker: „Investitionen und laufende Kosten für  $\text{H}_2$ -Leitung und  $\text{H}_2$ -Verdichtung von Gibraltar–Karlsruhe“, 25. Mai 1973, nur auszugsweise veröffentlicht in Bockris-Justi (1) und R. Kipker, Chem. Ing. Techn. **48**, Nr. 2 (1976), S. 138–139.
- (9) H. Knüfer: BWK **25** (1973), Nr. 12.
- (10) F. Herning: „Stoffströme in Rohrleitungen“. 1. Aufl. 1954. Düsseldorf, Deutscher Ing.-Verlag.
- (11) U. Boltendahl u. R. Harth: „Wärmetransport auf kaltem Wege“. Bild d. Wiss. Nr. 4, 1980, S. 45–55. („Adam und Eva“).

### Neuere zusammenfassende Publikationen:

- (12) W. Heese, K. Reiter u. J. Buchdorf: „Ermittlung und Vergleich der Transportkosten verschiedener Energieträger durch Rohrleitungen“. VGB Kraftwerkstechnik **61**, Nr. 7, Juli 1981, S. 571–579.

- (13) G. Kaske: „Petrochemischer Wasserstoff – Herstellung, Transport und Verwendung“. Chem. Ing. Techn. **48**, Nr. 2 (1976), S. 95–99.
- (14) O. H. Machnig: „Optimum Design of a Pipeline for the Transport of Hydrogen“, vervielfältigtes Vortragsmanuskript der CWH.
- (15) K.-J. Mundo (Fa. Uhde, Dortmund): „Gaserzeugungsanlagen für große Wasserstoffmengen“. Manuskript eines DECHEMA-Colloquiums-Vortrages Frankfurt, Frühjahr 1980.
- (16) R. Dahlberg: „Die großtechnische Nutzung der Sonne“, ein Beitrag zur Lösung der Probleme Energie, Umwelt und Bevölkerungsexplosion. Vortr. v. d. IHK Frankfurt, 8.10.81. Preprint.

Postadresse der Autoren: Physikzentrum der TU Braunschweig, Mendelssohnstraße 2, D-3300 Braunschweig, BRD.